

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CARGA INTELIGENTE CON PULSOS ADAPTATIVOS Y CON CONTROL DE RECARGA PARA BATERÍAS DE LI-ION.

Arles Jhovany Montoya Rojas

Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, Noviembre de 2018
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CARGA INTELIGENTE CON PULSOS ADAPTATIVOS Y CON CONTROL DE RECARGA PARA BATERÍAS DE LI-ION.
©Arles Jhovany Montoya Rojas

Director: Luis Hernando Ríos González

Pereira, Noviembre de 2018
Programa de Ingenieria Electrica
Universidad Tecnologica de Pereira
La Pereira(Colombia)
TEL: (+57)(6)3137122
www.utp.edu.co

Agradecimientos

Agradecerle a mi familia Guillermo Montoya, Marcela Rojas, Angie Montoya y a mi esposa Leidy Bonilla, quienes con su esfuerzo diario me han apoyado de manera constante y sin condiciones desde un inicio en esta etapa de formación académica, animándome a nunca desfallecer por lograr mi sueño. Agradecerle de manera muy especial al director de este trabajo de titulación, PhD Luis Hernando Ríos González, quien con verdadero compromiso de un profesional y amigo me ha apoyado, guiado y enseñado, para que este trabajo concluya con éxito.

Glosario

- SOC:
Estado de carga.
- Voltaje de Polarización:
Tensión que reduce el potencial de electrodos, lo que supone una pérdida de rendimiento y mayor consumo energético.
- Dendritas:
Acumulaciones de litio que puede llegar a crecer tanto que provocan cortocircuitos.
- Li-Ion:
Expresión reducida para iones de litio.
- Batería primaria:
Son aquellas que una vez que se agotan, son desechadas.
- Batería secundaria:
Termino que hace referencia a las baterías recargables.

Resumen

En la actualidad diversos dispositivos abastecen su energía de las baterías, las cuales pueden ser recargables o no, lo que inevitablemente conlleva a considerar el tipo de batería ideal, con gran autonomía y bajo costo, que permita aprovechar mejor los dispositivos. Es por esto que a diario se generan nuevos avances en la fabricación, construcción y recarga de baterías, buscando siempre mejorar los parámetros que lleven a una batería más segura, duradera y económica.

Nuevos materiales de fabricación alrededor de la tecnología basada en iones de litio son puestos a prueba a diario ya que esta tecnología proporciona una mayor densidad de carga, menor peso y su relación de tamaño se considera pequeña.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad proponer un sistema de carga que mejore los tiempos y disminuya los daños en la carga de las baterías de iones de litio, así como aumentar el número de ciclos de vida de las baterías.

El sistema de carga que se presenta en este trabajo de investigación está basado en pulsos que se adaptan en frecuencia y ciclos de trabajo dependiendo del SOC para baterías con tecnología en iones de litio.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos	4
1.4. Estado del arte	4
1.5. Estructura del trabajo de grado	8
2. Baterías de Litio-Ion	9
2.1. Proceso de Carga y Descarga en una Batería de Litio-Ion.	10
2.1.1. Proceso de Carga	11
2.1.2. Proceso de Descarga	11
2.2. Clasificación de las baterías de litio	13
2.3. Conexionado	13
2.4. Características Funcionales	14
2.5. Envejecimiento de las baterías de Litio-ion	16
2.5.1. Envejecimiento electroquímico	16
2.5.2. Influencia de la temperatura en el envejecimiento	16
2.5.3. Influencia de los procesos de carga y descarga en el envejecimiento	16
2.6. Modelos para Baterías de Litio-Ion	17
2.6.1. Definición y clasificación de modelos	17
2.6.2. Modelo de circuito equivalente para una batería de iones de litio de 18650	18
2.6.3. Selección corriente aceptable basada en la polarización	19
3. Algoritmos de Carga	24
3.0.1. Carga a Corriente Constante	25
3.0.2. Carga a Corriente Constante/Tensión Constante	25
3.0.3. Carga Multietapa de Corriente Constante	26
3.0.4. Carga a Pulsos	27
3.0.5. Carga de Pulso con Corriente Constante	27
3.0.6. Carga a Pulsos con un Único pulso de Descarga Intercalado en el Pulso de Carga con Tiempo de Descanso	28
3.0.7. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de la Frecuencia Optima	29
3.0.8. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de Ciclos de Trabajo	30
3.0.9. Carga a Pulsos con Tensión Constante Búsqueda de Ciclos de Trabajo y Frecuencia	32
3.1. Efectos de los Diferentes Métodos de Carga	33

3.1.1.	Carga de corriente constante	33
3.1.2.	Carga de corriente constante / Tensión constante	34
3.1.3.	Carga de pulso	35
3.1.4.	Carga a pulsos con un único pulso de descarga intercalado en el pulso de carga con tiempo de descanso	35
3.1.5.	Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de la Frecuencia Optima	35
3.1.6.	Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de Ciclos de Trabajo . .	35
3.1.7.	Pulso Adaptativos	36
4.	Método Propuesto	37
4.1.	Proceso de carga	38
4.2.	Diseño y Ejecución del Sistema	39
5.	Resultados Experimentales	48
6.	Conclusiones	51
6.1.	Futuros trabajos de investigación	51

Capítulo 1

Introducción

Las baterías juegan un papel importante en la cotidianidad de la población mundial, pues estas representan un suministro eléctrico para los diferentes dispositivos electrónicos del mercado, los más destacados en la actualidad son los teléfonos celulares, computadoras portátiles y vehículos eléctricos. El aumento de la demanda de estos dispositivos representa para el mercado un crecimiento exponencial. Sin duda el éxito que puede llegar a presentar un producto en el mercado no solo estará dictado por sus características y funciones, sino que también estará fuertemente ligado al tiempo que pueda funcionar sin llegar a quedarse sin energía, además del tiempo que lleva devolver las baterías a su capacidad máxima y los ciclos de vida que puede presentar [4].

A sido tal el impacto de las baterías en la sociedad que, en algunos países como Alemania, España entre otros, se han ejecutado proyectos con el fin de mejorar la confiabilidad de la red eléctrica, mitigar la intermitencia de la generación renovable y reducir los costes de operación del sistema de potencia agregando micro-redes. La tendencia a futuro presenta un aumento en el precio de la energía que se eleva año a año y, en consecuencia, se reflejará en un mayor pago al operador del sistema eléctrico. El almacenar la energía a gran escala parece una gran idea considerando que la tecnología y la mayor demanda de baterías irá disminuyendo sus precios conforme avance la investigación en este campo tecnológico, sin duda lo anterior hace que los avances tecnológicos se centren en mejorar los aspectos más relevantes de las baterías [9].

Una de las tecnologías más utilizadas son las baterías basadas en iones de litio, la cual se presenta como una buena fuente de energía por su alta densidad de energía comprendida entre $300 - 400 kWh/m^3$, alto Rendimiento alrededor del 94% con largos ciclo de vida alrededor de 4500 y un mínimo estado de carga de 10% [9]. Además de una alta tensión por batería, mínimo efecto memoria y baja tasa de autodescarga. La tendencia reciente muestra que las baterías de iones de litio no solo se usan ampliamente en aparatos portátiles, sino que también se pueden emplear en aplicaciones aeroespaciales, aéreas, militares, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía [2, 12].

A pesar de ser una tecnología que se usa con fuerza actualmente, no es una tecnología nueva ya que este tipo de baterías se empezaron a utilizar a finales de la década de los años 50 y han sido actualizadas por décadas para mejorar sus características. A menudo se emplea el óxido de cobalto de litio estratificado $LiCoO_2$ LCO como el material del cátodo y grafito C como el material del ánodo. Esta configuración provoca alta tensión de trabajo y densidad de energía.

Para mejorar el tiempo de carga y aumentar los ciclos de vida de las baterías con tecnología basada

en iones de litio el algoritmo utilizado para su carga juega el papel más importante, dado que en la forma en la que se inyecta la corriente a una batería puede afectar directamente la temperatura interna, sobrepasar el voltaje de polarización y generar pérdidas de material activo, lo que afecta la vida útil de las baterías. Bajo estas consecuencias se realizan constantemente investigaciones y se comparan algoritmos de carga.

Para superar estos problemas, el algoritmo basado en pulsos se presenta como uno de los mejores algoritmos debido a que se aplican períodos de relajación cortos durante el proceso de carga permitiendo que los iones de litio se difundan en interior de la batería. Los períodos de relajación cortos intercalados durante el proceso de carga incrementan la velocidad de transferencia de potencia, mejorando así la utilización del material activo y acelerando el proceso de carga [13].

1.1. Planteamiento del Problema

El principal problema al que se enfrenta los sistemas eléctricos de potencia es como almacenar la energía eléctrica, la cual no puede ser almacenada directamente, esta debe transformarse en otro tipo de energía como la mecánica, química o electromagnética.

En los últimos años el sector del almacenamiento de energía ha evolucionado exponencialmente, lo que ha llevado a contar con nuevas tecnologías disponibles, a la vez que se han mejorado características de los sistemas existentes.

Tecnologías que se pueden considerar como maduras, son el almacenamiento mediante bombeo hidroeléctrico, baterías de plomo-ácido y el almacenamiento mediante aire comprimido.

Si se tiene en cuenta las características técnicas y económicas de las diferentes tecnologías, las tecnologías más interesantes para el almacenamiento de energía a media y gran escala en el futuro son las baterías de flujo Redox de Vanadio y las baterías de Li-Ion.

La tecnología en baterías de Li-Ion se destaca por manejar un gran margen en almacenamiento de fuentes de energía renovables de pequeña, mediana y gran escala, con grandes proyectos de implementación a gran escala en la planta eólica de Feldheim (Alemania) 2015, en la planta híbrida de almacenamiento de electricidad en baterías de Barásoain (España) 2017 y en el transcurso de los siguientes años Tesla instalará la batería de litio más grande del mundo en Australia, además, estas baterías también se encuentran en múltiples dispositivos como celulares y vehículos eléctricos.

Las baterías de Li-Ion son ligeras, con una alta capacidad de carga, alta tensión por batería, mínimo efecto memoria y baja tasa de autodescarga. Pero se debe tener en cuenta su proceso de carga, la temperatura y el SOC para poder obtener de estas el mayor rendimiento.

Es ahí donde la Electrónica de potencia y la automatización se une para transformar y controlar las tensiones y las corrientes permitiendo adaptar la energía eléctrica para la carga controlada.

Con la idea de dar un control de carga a las baterías de Li-Ion se presentan algunos algoritmos de carga conocidos como el de carga a corriente y tensión constante, corrientes multietapas, pulsos con variación en la frecuencia o ciclos de trabajo y pulsos adaptativos.

La estrategia de carga con pulsos adaptativos se basa en proporcionar a la batería una corriente y tensión pulsada, con frecuencia y ciclos de trabajo variables, donde la variación de estos depende del SOC y el voltaje de polarización. Esto con el fin de entregar una mayor corriente de carga y un período de descanso, el cual permite la difusión y neutralización de los iones.

Teniendo en cuenta lo anterior no se cuenta con un prototipo estándar que permita regular los límites de corriente, tensión, temperatura y a la vez varíe tanto la frecuencia como los ciclos de trabajo en la carga de baterías de Li-ion dependiendo del SOC de las baterías.

1.2. Justificación

El problema de la carga adecuada para las baterías de Li-Ion se ha tratado de resolver por varios años, con la idea de volver este tipo de tecnología más eficiente.

Para resolver este problema completamente, hace falta diseñar un sistema de carga pulsado que varíe la frecuencia y el ciclo de trabajo dependiendo del SOC anterior.

Por medio de este proyecto de grado se busca una solución a la carga inadecuada de baterías de Li-Ion, manteniendo la batería a salvo, reduciendo la degradación de la misma, monitoreando y controlando el proceso de carga, las tensiones, intensidades y temperatura, además de las sobrecargas.

Así mismo, resolver este problema implica el aporte en la solución de la degradación, aumento de tamaño, daños y explosión en las baterías, además de aportar al mejoramiento de la capacidad y alargar la vida estimada de la batería.

En la medida que se logre un sistema de carga óptimo, se evite el deterioro y se aumenten los ciclos de vida de las baterías se puede llevar este tipo de almacenamiento a mayor escala, convirtiéndose en un aporte importante al sistema de almacenamiento o acumulación de energía a pequeña, mediana y gran escala.

Por otro lado, el aumento de los ciclos de vida y la disminución tanto del voltaje de polarización como la degradación en las baterías será mitigado por los aportes del proyecto de grado en control de carga y en el sistema de carga basado en pulsos adaptativos.

Finalmente se realizarán pruebas de laboratorio.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Diseñar un sistema de carga inteligente de pulsos que se adapten al SOC con control de carga para baterías de Li-Ion que regule la tensión con variaciones en la frecuencia y ciclo de trabajo dependiendo del SOC anterior de la batería, controlando así la temperatura interna y aumentando la inyección de corriente. Con esto reducir la degradación y la polarización, mejorando los ciclos de vida y evitando los daños causados a las baterías por un proceso de carga inadecuado.

1.3.2. Específicos

- Revisar el estado del arte relacionado con los algoritmos de carga para las baterías de Li-Ion.
- Analizar características y gráficas para encontrar la forma adecuada la carga.
- Establecer un bloque de medidas que permitan el control de corriente y tensión dependiendo del SOC de las baterías.
- Proponer un prototipo de carga para las baterías de Li-Ion.
- Realizar pruebas de laboratorio.

1.4. Estado del arte

En las últimas décadas múltiples autores han propuesto diversas metodologías para afrontar un almacenamiento de energía eficiente que permitan maximizar los recursos considerando las tecnologías existentes en el mercado. En [8] se describen las diferentes alternativas tecnológicas para afrontar un almacenamiento óptimo a mediana y gran escala como el bombeo hidroeléctrico, aire comprimido, supercondensador, pilas de combustible o de hidrógeno, almacenamiento térmico y el almacenamiento de energía mediante baterías. Pero la implementación y selección del tipo de tecnología se realiza teniendo en cuenta los aspectos técnicos y económicos [9].

Además de la descripción en [8], se destacan las opciones más interesantes para el almacenamiento a mediana y gran escala, donde las baterías basadas en tecnología de iones de litio se presentan como una gran opción gracias a su alta densidad, energía específica y tamaño, características que posicionan este tipo de tecnología dentro de las candidatas para ser integrada en un sistema.

En [9], se presentan algunas de las características de las baterías basadas en tecnología de iones de litio como lo son su alta Densidad de Energía comprendida entre $300 - 400 kWh/m^3$, alto Rendimiento alrededor del 94%, largos ciclo de vida alrededor de 4500 y un mínimo estado de carga de 10%. Debido a estas características, las baterías de Li-Ion son las más empleadas en artículos de electrónica de consumo, en la industria del coche eléctrico, aplicaciones aeroespaciales, militares y sistemas de almacenamiento de energía [2, 12].

El mayor problema que se presenta en el almacenamiento de energía con baterías de Li-Ion es el algoritmo de carga que se emplee, ya que este pueden perjudicar los ciclos de vida y la duración de la carga [4], por este motivo se generan nuevos análisis alrededor de esta problemática, y es así como en [10] se analizan simulaciones basadas en datos híbridos experimentales, los cuales predicen que las baterías cargadas con un sistema óptimo duran significativamente más tiempo que con los métodos típicos.

Los algoritmos varían el tiempo de carga, la eficiencia de carga y el impacto en los ciclos de vida de la batería, así como en la complejidad de la implementación, los sensores necesarios y su costo [19]. Pues un sistema de carga óptimo para baterías hace que sea más duradera la carga y aumenten los ciclos de vida. Para evitar todos estos inconvenientes y aumentar la eficiencia de las baterías de Li-ion se proponen diferentes algoritmos, tantos que se ha vuelto muy difícil determinar qué algoritmo es el más apropiado para una aplicación dada [19].

En [4] se analiza el algoritmo de carga a baja corriente constante el cual proporciona una tasa de corriente constante lenta lo que hace que este tipo de carga tome mucho tiempo en llegar a su capacidad máxima, este tipo de algoritmo es económico y simple de diseñar, pero no ayuda a optimizar el rendimiento de la batería y por el tiempo que toma en cargar la batería su proceso puede no ser vigilado y llevar a la sobrecarga [4].

Con la firme idea de reducir los tiempos de carga se estudió y desarrollo la forma de inyectar una corriente constante más alta que la del algoritmo anterior, sin embargo, este enfoque ignora el proceso electroquímico dentro de la batería, lo que conlleva a efectos negativos a largo plazo. Si la corriente constante se aplica durante un período de tiempo significativo, se genera un gradiente de concentración de iones debido a las limitaciones de transporte de masa dentro de la batería, esto da como resultado la generación de calor, junto con las dendritas y la formación cristalina deficiente de los electrodos. Todos estos factores llevan a una menor capacidad y reducen los ciclos de vida de la batería [4].

El siguiente paso en el estudio de algoritmos de carga es el de corriente constante (CC) / tensión constante (CV), en el cual se aplica una corriente constante hasta que la tensión de la batería se eleva a un 20 % de su SOC aproximadamente, equivalente a 3,5V en bornes de la batería en vacío, a partir de en ese instante la tensión de carga se mantiene constante y la corriente se reduce hasta alcanzar un valor mínimo y la carga se detiene. En este enfoque la corriente cae en la fase final de carga cuando hay menos superficie de electrodo disponible para reaccionar y la concentración total de iones puede ser menor [4].

En [13] se considera que la carga a tensión constante aumenta seriamente el tiempo de carga, además, la lenta difusión de iones de litio inevitablemente da como resultado una polarización de la concentración, especialmente a la carga de alta corriente, llevando la tensión de la batería rápidamente al límite superior de la tensión. Alternativamente, la carga a tensión constante baja la corriente al límite preestablecido antes de que el material activo en el electrodo se utilice por completo. Este enfoque se considera bien desarrollado y ampliamente adoptado en [4], pero el resultado directo afecta las baterías en las cuales se reduce la capacidad de la batería y disminuye la vida de estas.

El siguiente paso en la búsqueda de algoritmo de carga se remite a la implementación de estos mediante microcontroladores o computadoras. La velocidad de carga es más rápida y la eficiencia de carga es mayor que la obtenida con los algoritmos de corriente y tensión constante [19].

En [19, 22] se analiza la carga de corriente multietapas equivalente a cinco etapas de corriente constante. Donde la corriente se inyecta a la batería hasta que la tensión del terminal alcanza una tensión máxima de carga 4,2V; siempre que la tensión de la batería se cargue a tensión máximo, el proceso de carga cambiará a la siguiente etapa disminuyendo la magnitud de la corriente según la transición entre cada etapa, este algoritmo de carga presenta dos problemas importantes de estudio donde se dificulta la corriente de carga en cada etapa con el límite de tensión preestablecida y el segundo problema es que debe determinarse la corriente de carga apropiada en cada etapa.

Para no generar estos inconvenientes presentados en los algoritmos anteriores Jun Li, Edward Murphy, Jack Winnick, Paul A. Kohl en [13] proponen una técnica de carga por pulsos para eliminar la polarización, aumentar la velocidad de transferencia de potencia y reducir el tiempo de carga. Además, se demostró que la carga mediante pulsos interrumpe la carga continua con periodos de relajación cortos mejorando la utilización del material activo, las reacciones electroquímicas

y la generación de calor [5]. Se ha afirmado que la carga de pulso es un algoritmo de carga rápido y eficiente para baterías de iones de litio. Los resultados de la simulación proporcionan información sobre el efecto de los pulsos en el proceso interno e indican que el protocolo de carga de pulso mantiene mejor la estabilidad de la estructura del material activo del cátodo $LiCoO_2$, e impide el aumento en el espesor de la película pasiva en el ánodo de carbono lo que deriva en una vida útil más larga [13].

Richard C. Copeaand Yury Podrazhanskyb en [4] consideran que la carga a pulsos aumentan la eficiencia del proceso de carga por cuanto este método abordar los procesos químicos que ocurren en la batería. Periódicamente interrumpir la carga permite que los iones se difundan y distribuyan más uniformemente a través de la batería, con esto se minimizan los efectos negativos observados en la carga de corriente constante.

Muchos algoritmos de carga de pulso fueron desarrollados y básicamente, se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo es la carga de pulso con corriente constante, el segundo grupo es la carga de pulso con la tensión constante.

La carga de pulso con corriente constante en el cual se requiere monitorear la tensión de la batería en todo momento para garantizar que la tensión sea siempre más baja que la tensión de carga máxima preestablecida para evitar la sobretensión. El perfil de carga varia la amplitud y el ancho del pulso. Como resultado, las reacciones electroquímicas no producen calor ni causan la acumulación de presión dentro de la batería. Dado que este algoritmo de carga está diseñado para establecer el vínculo entre el perfil de corriente de carga de pulso y el proceso de reacción química. En principio puede cargar la batería más rápido y de manera más eficiente, así como prolongar la vida útil de la batería. [19].

En [14] Liang, T. J., Wen, T., Tseng, K. C., & Chen, J. F. propone un algoritmo de carga a pulsos de tensión constante con un único pulso de descarga intercalado en el pulso de carga con tiempo de descanso, en el cual existe un breve período de descanso seguido de un pulso de descarga de muy corta duración, esto es seguido de otro periodo de descanso y así continua hasta que la batería llegue a su máxima capacidad. La incorporación de un pulso negativo (de descarga) acelera el alcance del equilibrio de la concentración de iones y aborda algunos de los efectos negativos causados por reacciones químicas periféricas [14]. La limitación con un único pulso negativo es que, si éste es aplicado durante demasiado tiempo, pueden ocurrir efectos negativos. Estos efectos incluyen excesiva descarga de la batería, lo que aumenta el tiempo de carga y causa problemas en el transporte de iones en la dirección de la descarga [4].

El algoritmo de carga de búsqueda de ciclo de trabajo óptimo se analiza en [22, 3], donde la amplitud de los pulsos se fija a una tensión constante igual a $4,2V$ evitando las sobretensiones, se fija la frecuencia para lograr la corriente de carga más alta y se generan pulsos de diferentes ciclos de trabajos denominadas D. En este algoritmo se analiza la estrategia de carga de pulso donde se busca un D óptimo para acelerar la carga, obtener una mayor densidad de corriente y aumentar la eficiencia de carga al mismo tiempo, dado que un período de descanso grande, es decir un D pequeño da como resultado un tiempo de carga más largo y un D grande puede detener la difusión de iones dentro de la batería. Este algoritmo proporciona un período de descanso para que los iones se difundan y se distribuyan los iones de electrolito de manera más uniforme y con esto cambiar la concentración en la superficie del electrodo. Además Liang-Rui Chen en [3] estudia un D igual a el 50 % para obtener una alta eficiencia y una alta velocidad de carga al mismo tiempo. Sin embargo,

describe que el mejor ciclo de trabajo no debe ser fijo en $D = 0.5$ y que se debe encontrar un D de pulso adecuado para obtener el producto $D\Delta i$ máximo a fin de aumentar la velocidad de carga. Con lo cual el pulso adecuado para la carga es variable, es decir que los sistemas de carga de pulso tradicionales que utilizan pulsos fijos para cargar la batería no son perfectamente adecuados. El algoritmo de búsqueda de ciclo de trabajo óptimo demostró que el tiempo de carga es más corto y la eficiencia de carga es más alta que el de corriente y tensión constante [3].

El algoritmo de frecuencia variable al igual que en el algoritmo de variación de ciclo de trabajo la amplitud de los pulsos se mantiene constante a $4,2V$ y en este caso la variación se presenta en la frecuencia mientras el ciclo de trabajo se fija, esto con el fin de anular la respuesta de la corriente de carga en las baterías de Litio-Ion. En [2] se analiza que esta estrategia de carga proporcionar un período de descanso para que los iones se difundan y neutralicen, además se considera la búsqueda de una frecuencia óptima que reduzca al mínimo la impedancia de la batería logrando alcanzar la corriente de carga más alta. Eso significa que la pérdida de energía en la transferencia química se reduce al mínimo, es decir, la mejor reacción electroquímica se obtiene en la batería. Para encontrar fácilmente la frecuencia de pulso óptima, diferentes pulsos de frecuencia con la misma amplitud se aplican secuencialmente a la batería, y las corrientes promedio se miden al mismo tiempo. Luego, se puede encontrar la frecuencia óptima con la corriente de carga promedio máxima. Donde la frecuencia del pulso se varía para mantener la impedancia de la batería al mínimo. Este tipo de estrategia de carga de pulso realmente puede aumentar el ciclo de vida de la batería y reducir el tiempo de carga de la batería, y, por lo tanto, puede ser ampliamente utilizado en sistemas avanzados de carga de batería.

Está claro que la frecuencia de carga de pulso óptima es variable, lo que significa que los sistemas de carga de pulso tradicionales que utilizan un pulso de frecuencia fija para cargar la batería no son perfectamente adecuados, además en [2] se demostró que el tiempo de carga es más corto y la eficiencia de carga es más alta que el de corriente y tensión constante .

El algoritmo de carga de pulso adaptativos está diseñado para controlar el ancho del pulso y la frecuencia de carga en función de las características de la curva de polarización según el SOC de la batería. Este algoritmo se inicia con un ciclo de trabajo del 50 % el cual varía con el tiempo y se ajusta el rango de frecuencia de 500 Hz a 5000 Hz aumentando la frecuencia en pasos de 500Hz. Según el mecanismo de polarización, la inyección de corriente permitida se restringe considerando el SOC. La corriente de carga apropiada debe seleccionarse durante el tiempo de ejecución del proceso aumentando la tasa de carga para reducir el tiempo o disminuyendo la tasa de carga para minimizar el daño a la batería. Desde la operación exitosa de este modo, obtenemos la frecuencia óptima y el ancho de pulso óptimo, en la cual la impedancia de la batería se minimiza en gran medida y la mayor corriente de carga se inyecta en la Batería [22].

En [22] se analizan la velocidad de carga con frecuencia variable y la eficiencia de carga de la variación de ciclos de trabajo por separado, donde se determina que son lo suficientemente buenas para ser utilizadas en las aplicaciones de carga, pero ninguna considera factores de frecuencia y de ciclo de trabajo simultáneamente.

Sin embargo, la carga basada en pulsos necesita la compleja configuración de hardware para el monitoreo de la corriente, la tensión y la temperatura en el tiempo de carga. Además del costo de la complejidad del diseño y la variación inesperada de la corriente de carga puede conducir a la pérdida de rendimiento debido a la compensación del flujo de corriente [22].

Además del algoritmo de carga el SOC en algunas investigaciones demuestran que también juegan

un papel importante en la vida útil de la batería afectando la misma por el fenómeno de polarización. El voltaje de polarización es pequeño y relativamente estable influyendo en el rendimiento de carga y duración de esta dentro del rango medio de carga comprendido entre 20 % SOC y 80 % SOC, por otro lado, el voltaje de polarización muestra un crecimiento en la región de carga comprendida entre 80 % SOC hasta 100 % SOC considerado rango alto [12, 22].

Los resultados experimentales demuestran que el modo de carga propuesto puede equilibrar la velocidad de carga, la polarización y el aumento de temperatura [12, 22].

Con base en los trabajos anteriores, este proyecto propone un sistema de carga pulsado que se adapta al estado de SOC de la batería, con variaciones en la frecuencia y los ciclos de trabajo dentro del rango medio de carga comprendido entre el 20 % y el 80 % del SOC.

1.5. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma. En el capítulo 1 se presenta la introducción de la investigación realizada, posteriormente en el capítulo 2 se describen las baterías de Li-Ion. En el capítulo 3 se presentan algunos algoritmos de carga para baterías de Li-Ion. El capítulo 4 presenta el método propuesto. Luego en el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos durante la investigación con su respectivo análisis y finalmente el capítulo 6 muestra las diferentes conclusiones a las que llevo los resultados de la investigación.

Capítulo 2

Baterías de Litio-Ion

Una de las tecnologías más utilizadas en la actualidad son las baterías basadas en iones de litio, la cual se presenta como una buena fuente de energía por su alta densidad de energía comprendida entre $300 - 400 \text{ kWh/m}^3$, alto Rendimiento alrededor del 94 % con largos ciclo de vida alrededor de 4500 y un mínimo estado de carga de 10 % [9]. Debido a estas características, las baterías de Li-Ion son las más empleadas en artículos de electrónica de consumo, en la industria del coche eléctrico, aplicaciones aeroespaciales, militares y sistemas de almacenamiento de energía [2, 12, 9].

Una batería de una batería de iones de litio está compuesta por un electrodo positivo (Cátodo), un electrodo negativo (Ánodo) y un electrolito entre ambos que será el medio conductor. El cátodo no contiene litio en forma metálica, sino formando parte de un compuesto más complejo con otros metales (Co, Ni, Al, Mn, Fe). El Ánodo en la mayor parte de los casos es una matriz de grafito con el propósito de obtener una curva de descarga más plana. Los iones de litio se mueven de un electrodo a otro a través del electrolito (normalmente LiPF_6) durante la carga y la descarga, compensando la corriente electrónica que circula por el circuito exterior, Para evitar que los electrodos se toquen entre sí directamente, se coloca un separador microporoso entre ambos, lo que permite que sólo los iones y no las partículas de electrodos puedan migrar de un lado a otro [1, 18].

La mayoría de las baterías Li-ion comparten un diseño similar que consiste en un electrodo positivo de óxido de metal (cátodo) que está revestido en un colector de corriente de aluminio, un electrodo negativo (ánodo) hecho de carbono / grafito recubierto en un colector de corriente de cobre, un separador y electrolito hecho de sal de litio en un solvente orgánico. La Tabla 2.4 muestra la comparación entre las tecnologías más populares en el mercado de las baterías de Li-ion.

Acrónimo	Cátodo	Ánodo	Tensión de batería (V)	Energía específica (Wh/kg)
LCO	LiCoO_2	Grafito	3,7 – 3,9	140
LNO	LiNiO_2	Grafito	3,6	150
NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$	Grafito	3,65	130
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$	Grafito	3,8 – 4,0	170
LMO	LiMn_2O_4	Grafito	4,0	120
LNM	$\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$	Grafito	4,8	140
LFP	LiFePO_4	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	2,3 – 2,5	100

Tabla 2.1: Comparación de las tecnologías más populares en baterías de Li-ion [18].

2.1. Proceso de Carga y Descarga en una Batería de Litio-Ion.

Los iones de litio del interior de la batería fluyen de cátodo a ánodo a través del electrolito. Cuando se conecta una carga a los terminales de la batería, los electrones fluyen hasta equilibrar las cargas, obteniendo así la energía. Cuando cesa el flujo de iones y todos se encuentre ubicados en el ánodo, la batería estará agotada.

Para el proceso de carga, se aplica un flujo de electrones en sentido inverso.

Este Proceso de carga y descarga se puede observar en la figura 2.1.

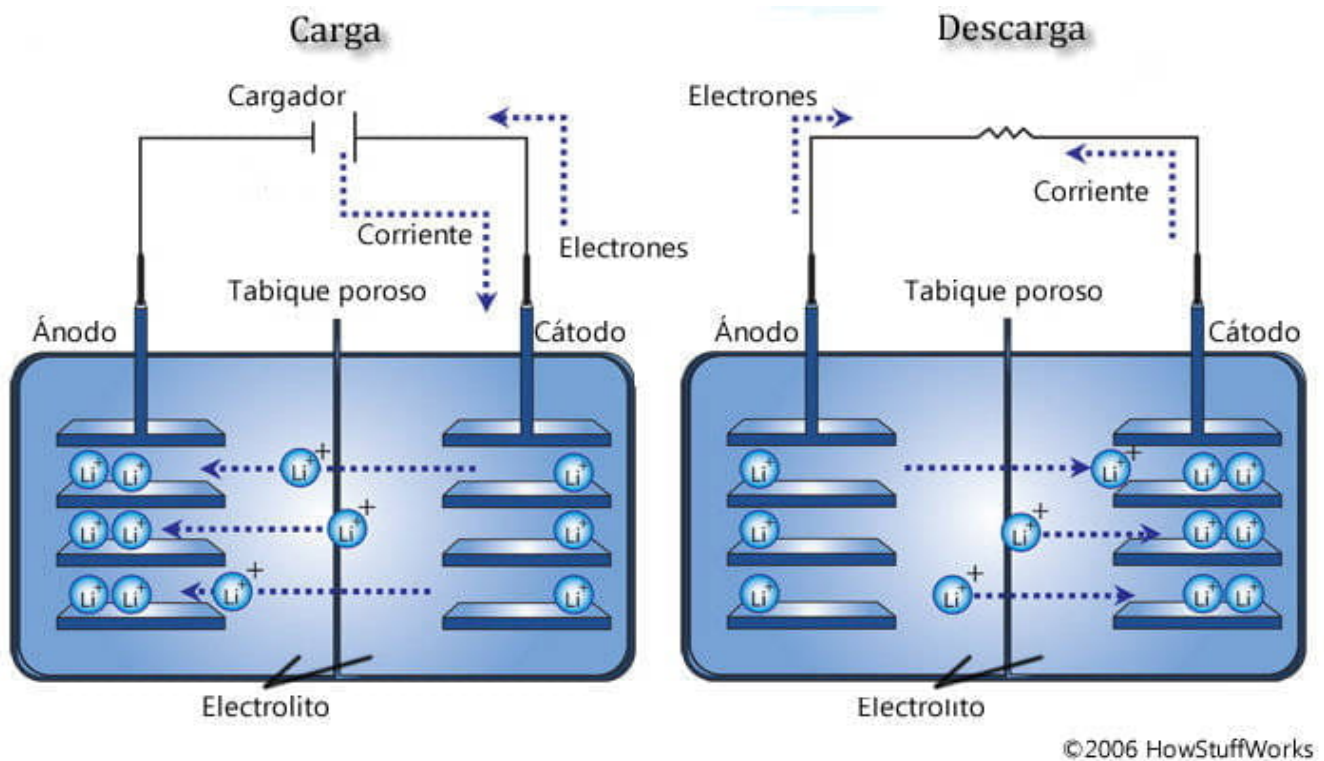


Figura 2.1: Esquema de una Batería de Li-Ion [7].

La cantidad de energía que se produce dependen del tipo de material que se use , para este trabajo de investigación se a escogido el litio,el cual proporciona un mayor potencial entre ánodo y cátodo. Uno de los inconvenientes presentado por este material su inestabilidad, la cual se puede compensar usando una aleación de litio y cobalto en el cátodo.

es de interes conocer el comportamiento de carga y descarga además del comportamiento del cátodo y el ánodo donde dependiendo el proceso el cátodo se comporta como el ánodo y viceversa, para fines de este trabajo de investigación se sigue el convenio de descarga, es decir, el electrodo positivo se denominará cátodo y el negativo ánodo.

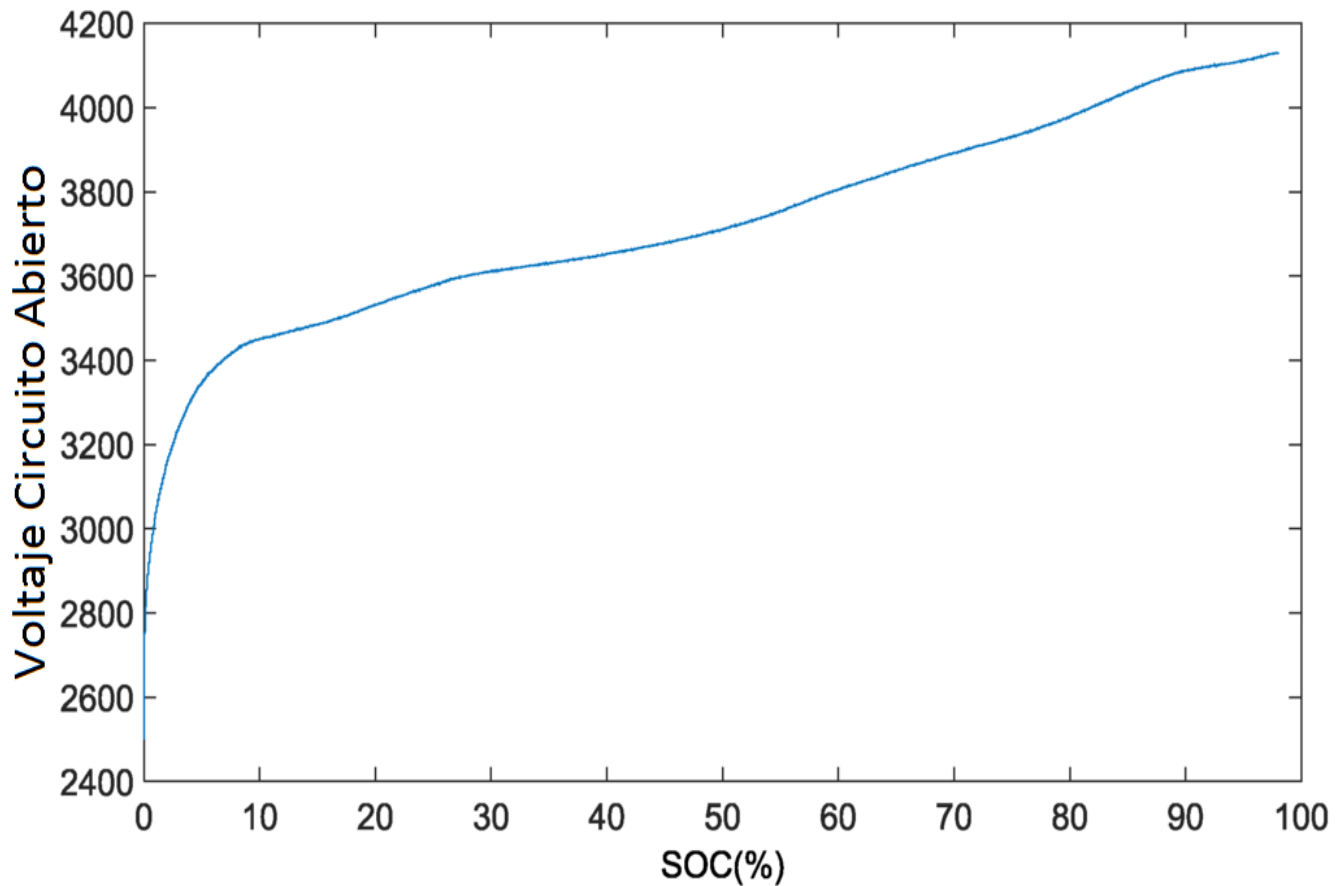


Figura 2.2: Estimación Gráfica del SOC Según la Tensión de Circuito Abierto (OCV-SOC) [22].

2.1.1. Proceso de Carga

Al contrario que muchos tipos de baterías, en las baterías de litio es necesario realizar una carga controlada con unos determinados parámetros. Para ello, será necesario un cargador específico que proporcione las características de carga necesarias.

En la Figura 2.2 se puede apreciar un ejemplo de un perfil OCV-SOC, en el cual se puede estimar gráficamente el SOC de una batería según sea su tensión de circuito abierto, además de conocer el comportamiento de la tensión de una batería cargada a tensión y corriente constante [22].

2.1.2. Proceso de Descarga

En la curva de descarga de una batería se pueden diferenciar tres zonas. Estas son, una primera llamada de activación, una segunda denominada óhmica, y finalmente, una tercera de caída libre de tensión, las cuales se pueden observar en la figura 2.3.

1. La primera zona se denomina la curva de activación por la polarización. En la cual se produce una caída de tensión en bornes de la batería o batería con una pendiente exponencial. Esta zona suele ocupar una una franja muy pequeña de la curva de descarga y tiene su origen en

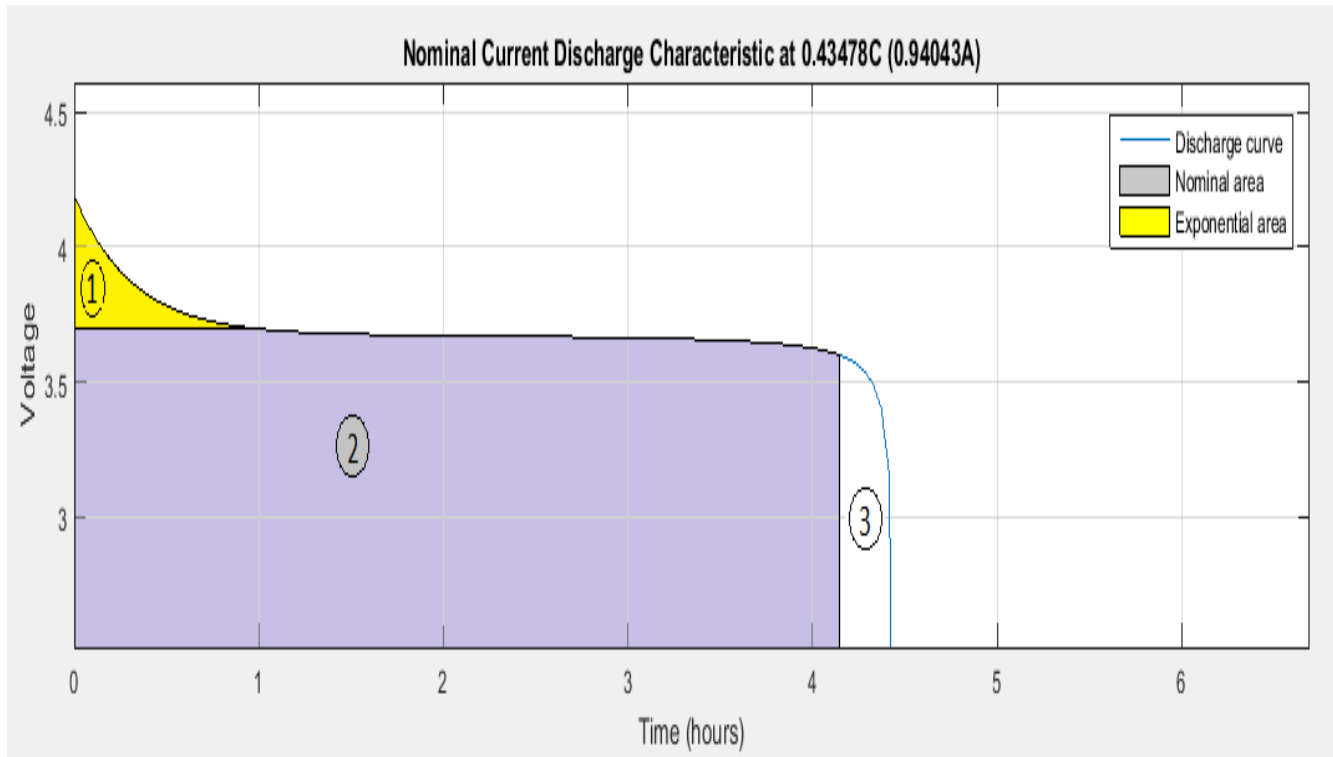


Figura 2.3: Descarga Típica de una Batería de Li-Ion [19].

los procesos químicos de activación de la propia batería.

2. La segunda zona de la curva se denomina zona óhmica o lineal. En este tramo se produce una caída de tensión en la batería proporcional al consumo de corriente que se realice. En esta zona se cumple la ley de Ohm, de ahí el nombre, siendo la resistencia la presentada por la batería y por la carga.
3. tercera zona denominada de caída libre de tensión, donde la tensión desciende abruptamente, debido a la reducción de la concentración de iones en el cátodo. Este proceso ocurre cuando la batería está próxima a descargarse completamente y la polarización no es capaz de mantener la tensión entre los bornes de la batería [18].

Cuando se sobrepasa la tercer zona es aproximadamente el 80 % de la capacidad de descarga la tensión de la batería decae con una pendiente mucho mayor que para el porcentaje de la zona dos, bajando rápidamente a los 2,8V de descarga mínima permitida. Además, una vez se pase el umbral no habrá manera de saber con qué velocidad se llega a los 2,8V. Aun conociendo la curva de descarga, esta no será siempre la misma, variará en función del envejecimiento de la batería.

2.2. Clasificación de las baterías de litio

Existen diferentes tipos de baterías secundarias de litio, las cuales se pueden agrupar fácilmente en tres grandes grupos:

1. Baterías de litio metálico.
2. Baterías de iones de litio.
3. Baterías de litio-polímero.

El primer grupo, baterías de litio metálico, se agrupan todas aquellas baterías secundarias de litio que tienen ánodo de litio metálico las cuales poseen un electrolito líquido de sal de litio. Tecnología peligrosa y obsoleta.

El segundo grupo está formado por todos los tipos de baterías de iones de litio que existen en el mercado, las cuales el ánodo no tiene como tal litio metálico sino otro material con inserción de átomos de litio, además, poseen un electrolito líquido de sal de litio. Dentro de este grupo, se pueden clasificar según el compuesto que utilicen tanto en el cátodo como en el ánodo, los cuales se describen en las tablas 2.2 y 2.3, o en función de su aplicación, como se indica en la Tabla 2.4.

El tercer grupo lo conforman las llamadas baterías de litio-polímero. Este tipo de baterías son realmente una evolución en cuanto a lo que electrolito se refiere. A diferencia de los dos grupos anteriores este grupo contienen un electrolito de tipo sólido o gel mezclado con componentes poliméricos [18].

Algunas baterías de iones de litio tienen un electrolito sólido, que sirve tanto como medio conductor iónico como separador. Estas baterías de iones de litio a veces se llaman baterías de polímero de iones de litio o baterías de polímero de litio. Sin embargo, no importa qué electrolito (líquido o sólido) se use en la batería, las especies cargadas que se intercalan en la batería son los iones de litio, y por lo tanto, generalmente se denominan baterías de iones de litio [19].

Materiales del Cátodo para Baterías de Li-Ion	
Material	Abreviación
Óxido de cobalto de litio ($LiCoO_2$)	LCO
Óxido de cobalto de litio ($LiMn_2O_4$)	LMO
Fosfato de hierro de litio ($LiFePO_4$)	LFP
Polvo de óxido de cobalto de níquel-manganeso de litio ($LiNiO_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$)	NMC

Tabla 2.2: Materiales típicos que forman el cátodo de las baterías de iones de litio [18].

2.3. Conexión

El conexionado de las baterías depende de la tensión y la capacidad que se requiera. Es por esto que se requiere conocer la tensión nominal de cada batería o batería. En este trabajo de investigación

Materiales del Ánodo para Baterías de Li-Ion	
Material	Abreviación
Grafito (<i>Grafito natural o sinttico</i>)	C
Titanio de litio (<i>Li4Ti5O12</i>)	LTO

Tabla 2.3: Materiales típicos que forman el ánodo de las baterías de iones de litio [18].

Aplicación	Cátodo	Ánodo
Alta Energía	<i>LiCoO₂, LiMn₂O₄, LiNi_{0,33}Mn_{0,33}CoO₂</i>	<i>Grafito</i>
Alta Potencia	<i>LiFePO₄LiNi_{0,33}Mn_{0,33}CoO₂</i>	<i>Grafito Li4Ti5O12</i>
Larga Vida	<i>LiFePO₄</i>	<i>Grafito Li4Ti5O12</i>

Tabla 2.4: Comparación de componentes en función de las necesidades requeridas [18].

se va a trabajar con baterías de Li-Ion del cual es preciso recordar que queda batería tiene como máxima tensión 4,2V, mínima tensión 2,8V y una tensión nominal o RMS de 3,6V.

- **Baterías en Serie:**
Colocando baterías en serie, la tensión del conjunto aumentará como la tensión nominal de cada célula 3,6V por el número de baterías.
- **Baterías en Paralelo:**
En este caso, será la capacidad la que se verá incrementada de forma proporcional al número de baterías añadidas.
- **Packs de Baterías:**
Es posible construir un packs de baterías combinando serie y paralelo para obtener la capacidad y tensión deseada. Hay que tener en cuenta que la tensión nominal de cada célula será siempre de 3,6V, siendo variable la capacidad.

Para este trabajo de investigación se realizara una implementación de carga con un pack de baterías con una tensión máxima de 25,2V, una tensión RMS igual a 24,6V y una capacidad de 2200mAh. Para lo cual se utilizaron 6 baterías en serie.

2.4. Características Funcionales

Las características principales son:

- **Tensión:**
Toda batería posee una tensión nominal de 3,6V. La tensión a carga completa es de 4,2V. Es muy importante que la tensión de descarga no baje de los 2,8V y tampoco deben superarse los 4,2V durante el proceso de carga.
- **Capacidad:**
Indica la cantidad de energía que puede llegar almacenar una batería, medida que se entrega en miliamperios o amperios hora (mAh). A mayor valor, mayor duración.

- Coeficiente (C):

Una batería de litio está diseñada para ser descargada o cargada a una cierta corriente máxima la cual esta indicada por el coeficiente C . Para determinar la máxima corriente permitida, bastará con multiplicar el coeficiente C por la capacidad de la batería. La tasa C se suele utilizar en forma de múltiplos o fracciones, dependiendo de la corriente de carga o descarga.

Por ejemplo, para una batería de $2,6Ah$ de capacidad, la tasa de descarga C es equivalente a descargar la batería en una hora con una corriente de $2,6A$. Una tasa de descarga $0,5C$ equivale a descargar la batería con $1,3A$. En definitiva, la tasa C indica la rapidez con la que se está cargando o descargando una batería relativamente a su capacidad nominal.

- Coeficiente de Carga:

No confundir con el anterior. También se expresa como múltiplo de la capacidad, para ver a la intensidad máxima a la que podremos cargar la batería bastará con multiplicar el coeficiente de carga por la capacidad.

- Tasa de Carga: La tasa de carga en una batería es un parámetro importante para evaluar la velocidad de carga, lo cual está permitido en términos de confiabilidad. La tasa de carga $C/10$ significa que la capacidad de la batería se devuelve en $10h$.

- Duración:

Teóricamente, para saber la duración de una batería (en horas) nos bastará con dividir la capacidad de la batería (mAh) entre la velocidad de descarga (mA). El tiempo calculado mediante esta relación siempre será mayor que el experimental, por diversas razones, como que el dispositivo no se descargue totalmente por motivos de seguridad, pérdidas, o la incapacidad de proporcionar la máxima corriente de manera continuada.

- DOD (Profundidad de descarga):

La profundidad de descarga de una batería es el ratio de energía descargada en relación a la cantidad de energía que puede almacenar. Se expresa en porcentaje, y es el contrario al SOC $SOC = 1 - DOC$.

- Resistencia interna:

Si la batería se encuentra en un buen estado esta debe ser baja. Aumenta con el estado de carga, temperatura y envejecimiento. Es difícil de controlar, disminuyendo el rendimiento de la batería [1].

- SOC ():

Se refiere a la cantidad de carga disponible en una batería. SOC es proporcional a la carga restante en comparación con el estado de la batería completamente cargada. El SOC no se puede medir, y solo se puede estimar mediante otros parámetros medibles, como la tensión de circuito abierto (OCV) y la curva OCV-SOC, esta curva se puede apreciar en la figura 2.2 [22].

Debido a la gran diversidad de baterías de iones de litio, se va a utilizar primeramente una batería compuesta por un cátodo de tipo LCO y un ánodo de grafito para explicar el proceso de almacenamiento, carga y descarga en una batería de Li-ion.

2.5. Envejecimiento de las baterías de Litio-ion

En el proceso de envejecimiento de una batería influyen los ciclos de carga y descarga, la temperatura y la exposición a sobretensiones entre otros. A continuación, se detallan algunos de ellos.

2.5.1. Envejecimiento electroquímico

Los principales procesos que intervienen en el envejecimiento de una batería de iones de litio son aquellos relacionados con la reacción química que ocurre en la baterías.

2.5.2. Influencia de la temperatura en el envejecimiento

Algunos de los procesos que se aceleran con altas temperaturas son la autodescarga del compartimento anódico durante las condiciones de almacenamiento, la pérdida de litio utilizable, la formación de película superficial en los electrodos y la oxidación electrolítica entre otros.

Por tanto, la evaluación del efecto de la temperatura sobre el envejecimiento es una tarea compleja, ya que tanto las fuentes de calor externas como la generación interna de calor influyen de manera activa en los comportamientos internos de la batería, activando diversos procesos que son diferentes en función del tipo de batería y el rango de temperatura considerado.

Sin embargo, si la temperatura aumenta por encima de los límites permitidos, la estabilidad de la estructura del enrejado del cátodo de la batería está empeorando, lo que no solo acelera la degradación de la batería, sino que también genera riesgos de seguridad para la batería [23].

2.5.3. Influencia de los procesos de carga y descarga en el envejecimiento

Mantener a una batería de iones de litio en valores extremos de SOC, es decir, cercanos a la descarga o la carga completa, durante periodos elevados es perjudicial para los componentes internos de la batería. En concreto, mantener altos valores de SOC reduce la estabilidad de ambos electrodos y el electrolito, mientras que con bajos valores de SOC se produce corrosión en los colectores de corriente.

Además, otro efecto perjudicial de cargar una batería de litio hasta el 100 % de su capacidad es la acumulación de litio sólido en la superficie del electrodo. La consecuencia directa de esta acumulación es un aumento de la resistencia interna de la batería así como una pérdida progresiva de la capacidad al disminuir la cantidad de litio útil.

En cuanto a la velocidad de los procesos de carga o descarga, se ha observado que el uso de altas velocidades de carga y descarga produce tanto un aumento de la resistencia interna como una disminución de la capacidad de la célula. Las altas corrientes producen una temperatura localizada que puede conducir a la modificación ya la interrupción de las capas superficiales del electrodo.

A mayores, a medida que aumenta la velocidad de carga o descarga, la transformación química requerida en los electrodos (en el cátodo en particular) no puede mantenerse al ritmo de la corriente

extraída. Esto provoca gradientes de concentración abruptos, reacciones químicas no deseadas, así como cambios en la morfología de los electrodos que podrían comprometer su integridad, afectando tanto la impedancia interna como la capacidad de la célula.

2.6. Modelos para Baterías de Litio-Ion

Para lograr un buen control de la energía y del estado de carga entre otros se estudian actualmente una serie de modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento de las baterías y predecir sus características futuras.

2.6.1. Definición y clasificación de modelos

Un modelo de una batería es un modelo matemático que describe de forma analítica el comportamiento de un sistema.

Todos los modelos llevan asociados un cierto grado de exactitud que se determina según la fidelidad con la que se construye el modelo y de los valores de las variables utilizadas en el mismo.

Dependiendo del sistema real a modelar, se puede obtener modelos sencillos o complejos. La complejidad depende de la cantidad de parámetros que se incorporen al modelo y de las características propias del sistema real.

la inclusión de un elevado número de parámetros eleva la exactitud del modelo, si bien al mismo tiempo que dificulta su aplicación e incluso la estimación de los valores adecuados.

La literatura científica actual contiene multitud de procesos y modelos diferentes para las baterías de Li-ion. Dentro de esta variedad, los modelos se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo al tipo de modelo base:

- Modelos electroquímicos:

Se basan en las características constructivas y los fenómenos electroquímicos que se producen en el interior de la batería. Este modelo es capaz de reproducir de forma muy exacta el comportamiento de la batería. Sin embargo, estos modelos son muy complejos ya que necesitan ecuaciones diferenciales no lineales para reproducir el comportamiento de la batería.

- Modelos de circuito equivalente:

Son modelos que utilizan elementos eléctricos tales como resistencias, bobinas, condensadores y fuentes de tensión entre otros para simular el comportamiento de la batería. este modelo presenta un diseño más simple que requiere menos carga computacional para los cálculos.

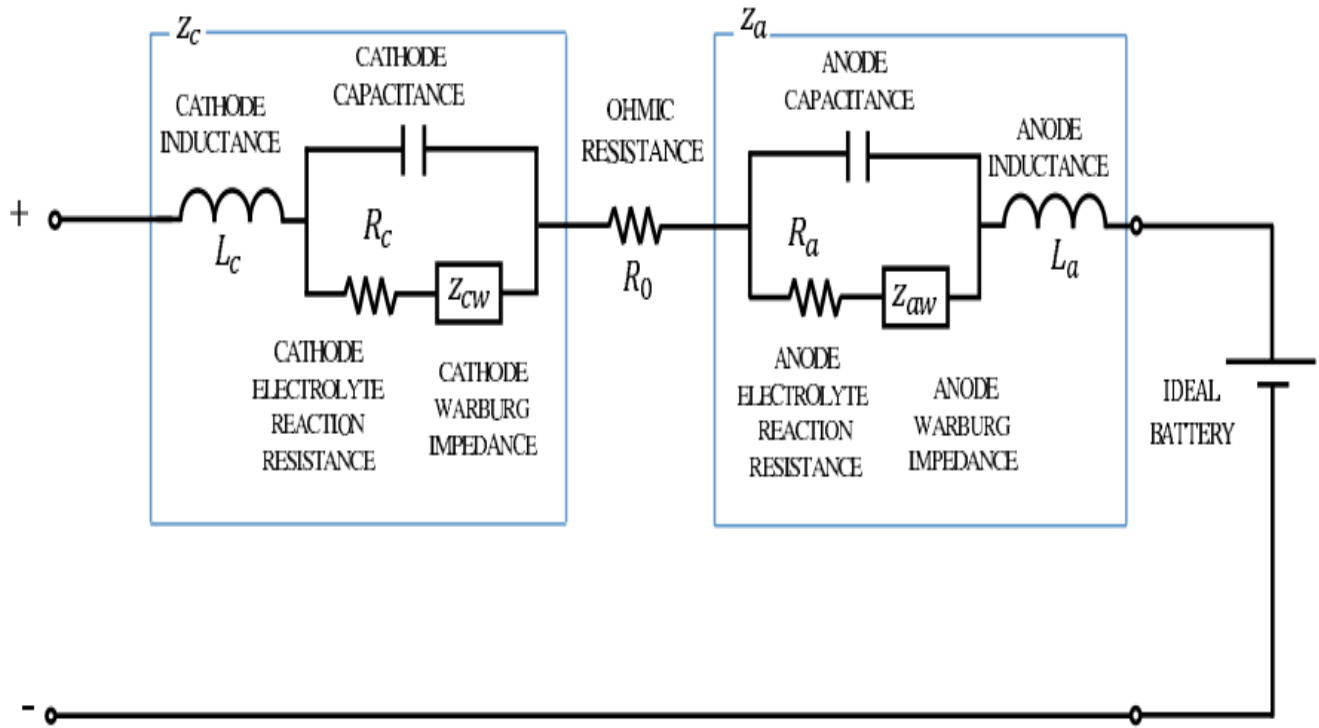


Figura 2.4: Modelo de impedancia AC [17].

2.6.2. Modelo de circuito equivalente para una batería de iones de litio de 18650

Para el modelado de la batería de iones de litio se acudió a la simulación de impedancia AC que caracteriza el comportamiento electroquímico de la batería y permite ajustar los parámetros a un circuito eléctrico equivalente, como se puede observar en la figura 2.4.

Este enfoque puede capturar con precisión el rendimiento de una batería determinada y puede ser el mejor enfoque para caracterizar las baterías en ausencia de una comprensión teórica de la batería. El modelo de circuito equivalente es un enfoque poderoso para el análisis numérico del comportamiento de la batería, que describe las características de la batería como capacitiva y resistiva [20, 22].

La resistencia Óhmica R_0 representa el efecto completo de la resistencia electrolítica, el separador, la geometría del electrodo y otras resistencias debidas a las conexiones eléctricas. La capacitancia acumulada entre la superficie del electrodo y el medio electrolítico se representa como C_c y C_a . La formación de capas superficiales en el electrodo a veces también parece ser inductiva L_c y L_a . La transferencia de estado de carga se representa como resistencias eléctricas R_c y R_a en el modelo equivalente, que puede variarse con la temperatura, la concentración de los productos de reacción y el potencial de los electrodos. Además, se puede desarrollar una impedancia debido a la difusión de iones en el electrolito conocida como la impedancia de Warburg que representa los efectos de difusión de iones en un medio electrolítico colocado entre electrodos cinéticamente reversibles Z_{cw} y Z_{aw} [17].

Si se mantienen las condiciones electroquímicas óptimas durante todo el proceso de carga, la má-

xima energía posible se puede transferir a la batería con una pérdida electroquímica mínima a velocidad máxima. La reacción química estable y monótona permite que circule una corriente más alta a través de la batería, lo que significa que se presenta una baja impedancia resultante en el modelo de impedancia de CA. La impedancia de la mayoría de los elementos, incluida la impedancia de Warburg, depende directamente de la frecuencia del pulso aplicado.

Los espectros de impedancia de CA se pueden interpretar a partir de los valores de los parámetros. El ánodo y el cátodo tiene una capacitancia y una resistencia que marcan fuertemente el comportamiento de una batería de litio a la hora de ser cargada o descargada. El ánodo exhibe una mayor impedancia a frecuencias intermedias, pero, debido a la alta capacitancia, la impedancia disminuye a altas frecuencias más rápidamente para el ánodo que el cátodo. A muy altas frecuencias, las impedancias del ánodo y el cátodo caen hacia cero, porque la corriente se deriva a través de la capacitancia, mientras que la impedancia de la batería alcanza un valor constante debido a la impedancia del separador. A bajas frecuencias, la impedancia del ánodo es menor que la impedancia del cátodo porque el coeficiente de difusión del ánodo es mucho mayor que el del cátodo [20].

La característica capacitiva de la batería causa diferentes respuestas a diferentes pulsos de frecuencia, que se activan cuando la batería se está cargando [22].

Después de las pruebas realizadas en [20] y [22] se conocen los siguientes resultados:

- La impedancia no era sensible a la proporción de cátodo a material del ánodo y dependía solo ligeramente del grosor del electrodo. La impedancia varió con el estado de carga, y esta variación podría proporcionar una forma útil de explorar la dependencia tanto del potencial de equilibrio como del coeficiente de difusión sobre la concentración. La impedancia era muy sensible a la capacitancia de los electrodos y a los parámetros cinéticos [20].
- La impedancia de CA de la batería disminuye a medida que la frecuencia aumenta a 5000 Hz, que se mide con el analizador Solartron 1280 (AMETEK, Oak Ridge, TN, EE.UU.). Sin embargo, la impedancia de CA aumenta exponencialmente en el rango de 5000-100,000Hz [22].

La figura 2.5 muestra que la impedancia es más dependiente de la frecuencia de carga del impulso que el SOC. en la cual se tomaron frecuencias iguales a $0,01Hz$, $0,1Hz$, $1Hz$ y $100Hz$ lo que indica que la impedancia caerá regularmente cuando la frecuencia aumente [22].

2.6.3. Selección corriente aceptable basada en la polarización

En la Figura 2.6 se puede observar la respuesta obtenida al aplicar un pulso a una batería en un periodo, donde se evidencia la respuesta tardía de la corriente de carga seguido de una respuesta instantanea dentro de un corte [22].

La Figura 2.7 muestra la relajación de la difusión después de un período del modo de carga de corriente constante. La tensión del terminal disminuye bruscamente después del período de carga debido a que el voltaje de polarización disminuye rápidamente. El tiempo de relajación durará

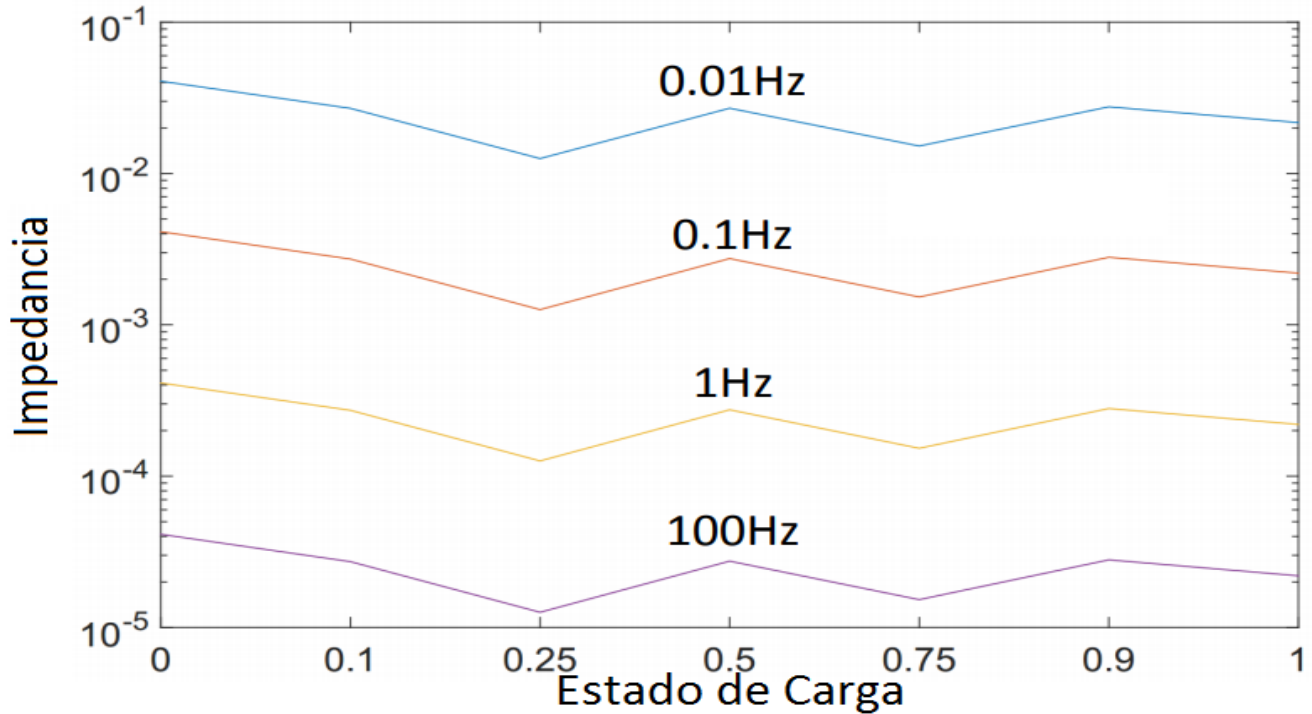


Figura 2.5: Variación de la Impedancia Dependiendo de la Frecuencia y el SOC [22].

unas horas antes de que el estado se establezca por completo. La tensión del terminal se establece después de 1000 s (en el tiempo absoluto de 1250 s) transcurrido desde la liberación del pulso [22].

Las características del voltaje de polarización de las baterías de iones de litio se investigan a diferentes velocidades de carga donde se pueden obtener los siguientes resultados.

Según el mecanismo de polarización, la inyección de corriente permitida se restringe considerando el SOC de la batería, que se mide en la figura 2.8. Por lo tanto, la corriente de carga apropiadamente aceptable debe seleccionarse durante el tiempo de ejecución del proceso de carga aumentando la tasa de carga para reducir el tiempo o disminuyendo la velocidad de carga para minimizar el daño a la batería.

De la figura 2.8 se puede observar que el voltaje de polarización se puede dividir en tres regiones. La primera región que presenta forma no lineal y comprende los porcentajes 0 %-5 % y 85 %-100 % del SOC donde la polarización de la batería es grande y representa los valores extremos de carga. La segunda región que presenta forma lineal e incluye los porcentajes 5 %-25 % y 65 %-85 % del SOC donde la polarización aumenta a medida que aumenta la corriente de carga.

La última parte donde también presenta un comportamiento lineal y las pendientes son casi las mismas entre ellas y comprende el porcentaje entre el 5 % y 85 % del SOC. Esta región comprendida como la región del medio.

El voltaje de polarización es pequeño y relativamente estable en el rango del estado medio de carga donde los iones de litio se distribuyen bien en ambos electrodos, el coeficiente de difusión es mayor y los iones de litio tienen suficiente espacio libre para moverse con facilidad, mientras que, en ambos extremos del SOC, el voltaje de polarización se agranda y varía rápidamente. Lo que

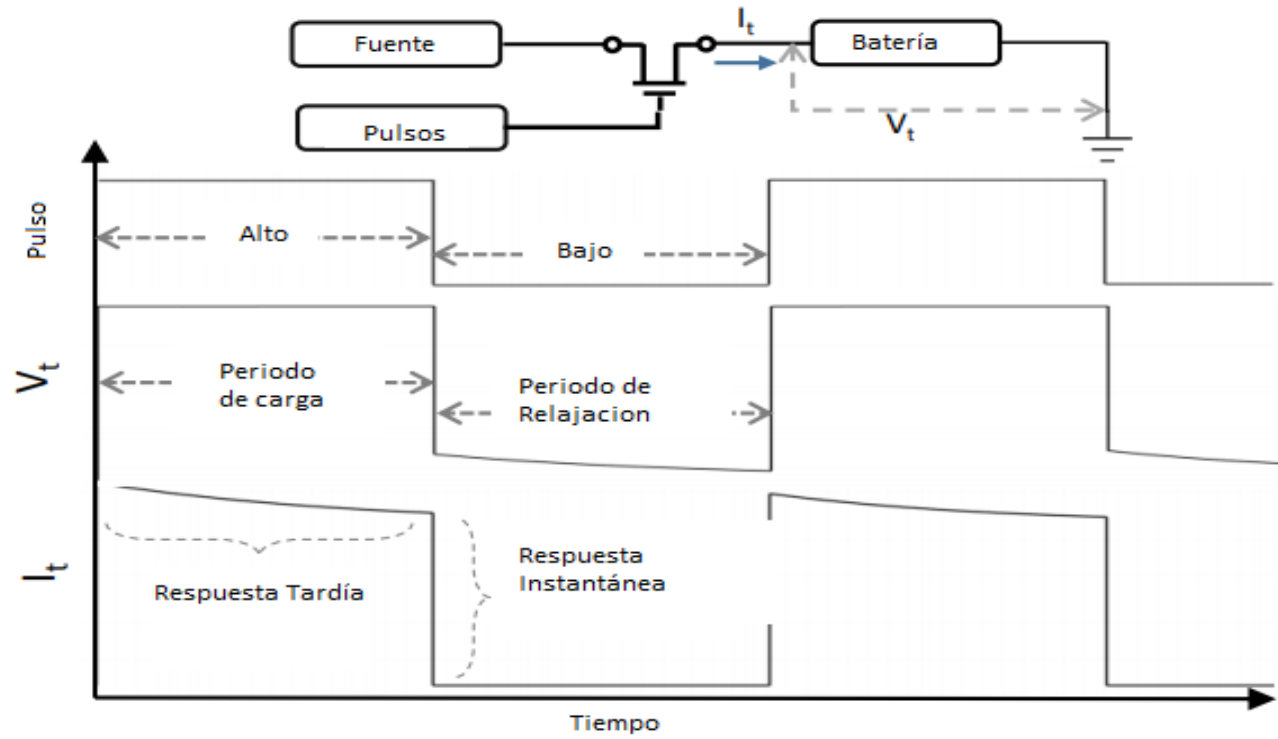


Figura 2.6: Respuesta de la Tensión y Corriente Luego de Aplicado un Pulso a una Bateria de Li-Ion [22].

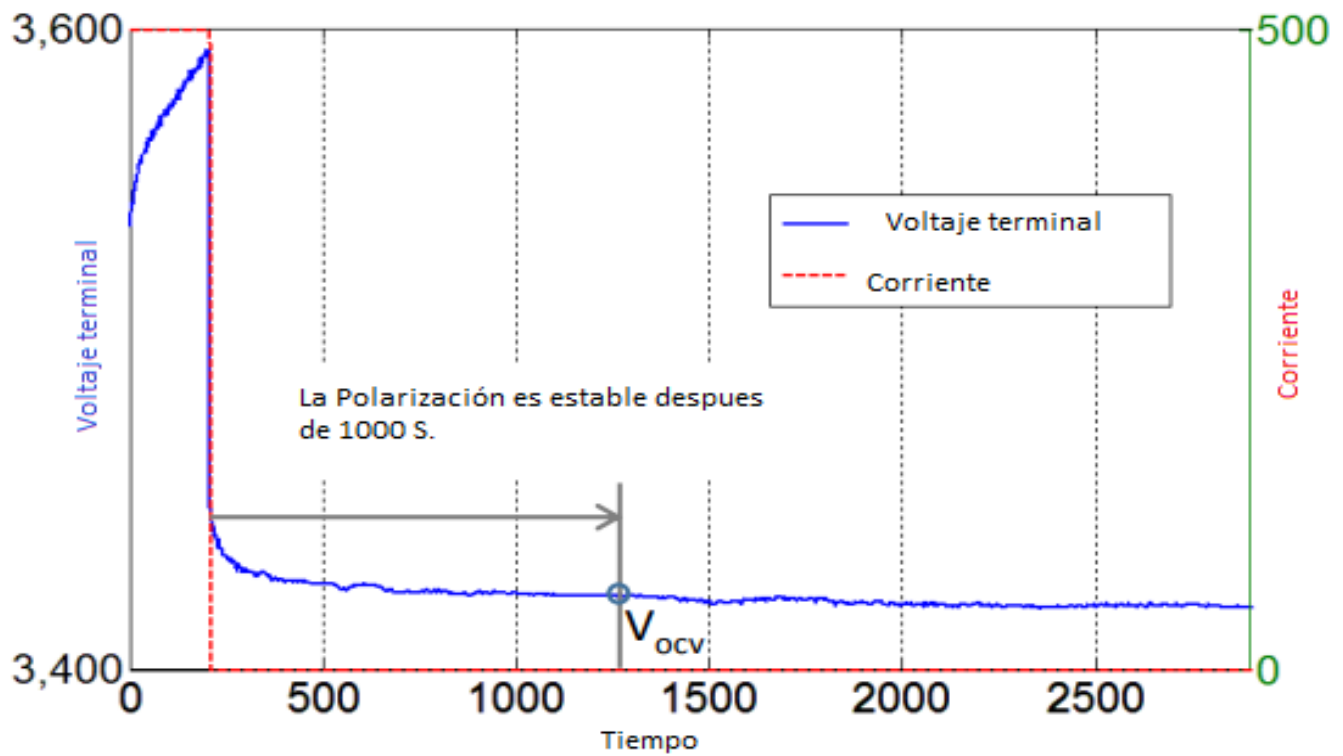


Figura 2.7: Difusión Después de aplicado un Pulso en una Bateria de Li-Ion [22].

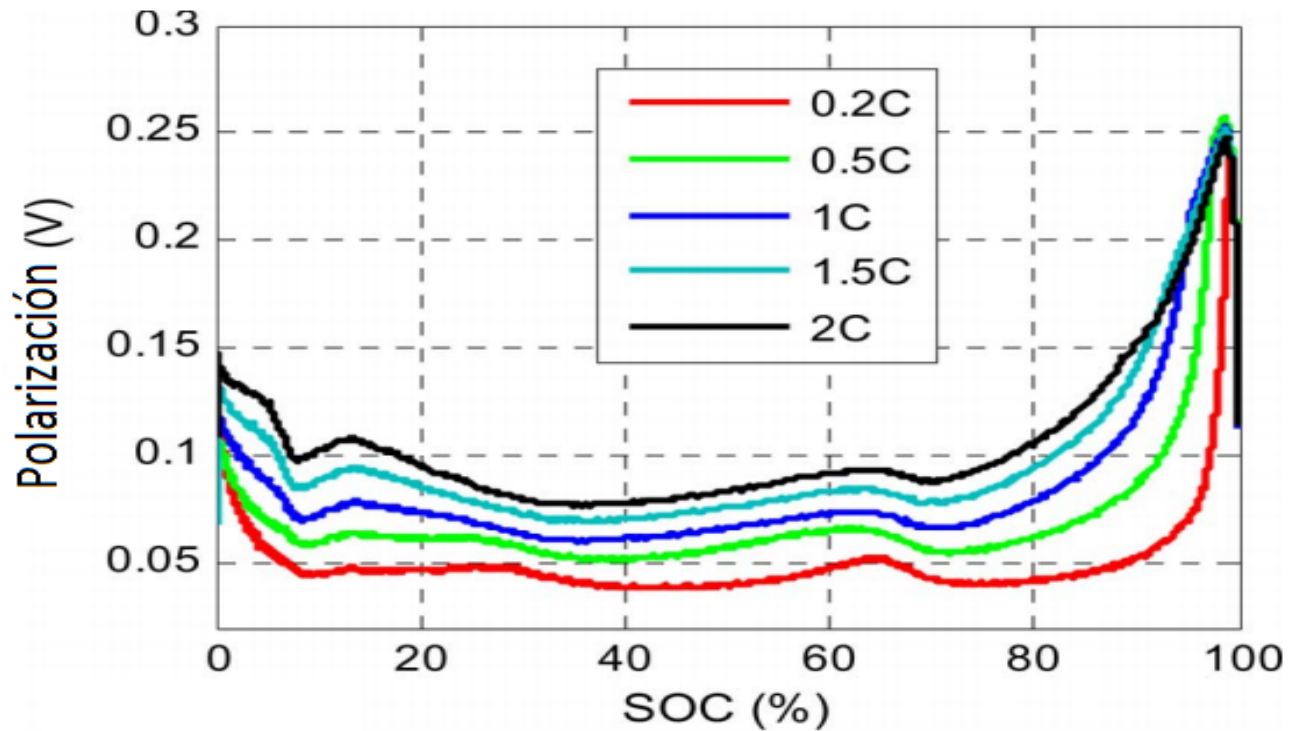


Figura 2.8: Perfiles de Voltaje de Polarización a Diferentes Tasas de Carga Versus el SOC [12].

demuestra que existe una relación lineal aproximada entre el voltaje de polarización y la velocidad de carga [12].

En [12] proponen una curva de corriente de carga aceptable sin sobrepasar la curva límite de polarización como se puede observar en la figura 2.9. Donde la batería se carga por primera vez en $C/3$, desde 0% SOC hasta 20% SOC. La corriente de $2C$ que es límite establecido para la batería con la que se realizaron las pruebas, se aplica después de un 20% de SOC hasta que se cruza con la curva límite. Luego, cada 5% de SOC, la corriente de carga se reduce de acuerdo con la curva de límite. La corriente de carga se reducirá a $C/3$ en aproximadamente 80% del SOC, seguido de un proceso $C/3$ corriente constante y tensión constante hasta finalizar el proceso de carga.

Desde el punto de vista del aumento de la temperatura, la corriente de carga aplicada con la curva propuesta disminuye gradualmente el aumento de la temperatura, lo que puede evitar efectivamente que la batería se descarrile térmicamente [12].

La curva de corriente de carga aceptable final debe tener en cuenta el aumento de temperatura, la duración de la batería y la eficiencia de carga para obtener valores de corriente de carga razonables [12].

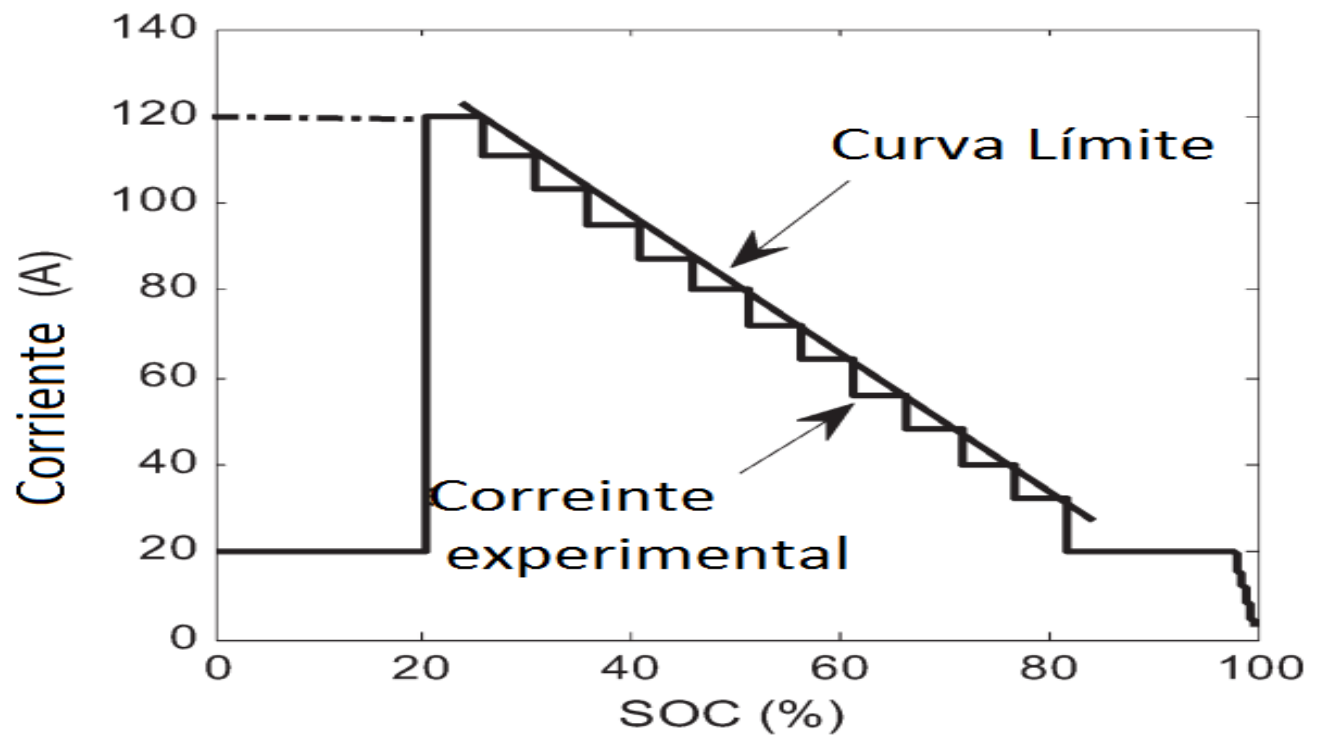


Figura 2.9: Corriente de Carga Propuesta para Disminuir la Polarización [12].

Capítulo 3

Algoritmos de Carga

Para maximizar el rendimiento de una batería secundaria el régimen de carga debe colaborar con el proceso electroquímico donde se asegure una alta y uniforme concentración de iones en el electrodo que está consumiendo iones. Existen varias técnicas utilizadas para cargar baterías.

El trabajo de investigación y desarrollo ha elevado el nivel de la tecnología de carga de la batería a uno que monitorea y responde dinámicamente el estado electroquímico de la batería. La tecnología de "forma de onda electroquímica dinámica" ha tomado el trabajo de la carga de pulsos y la ha movido a un nuevo nivel. Siguiendo estos avances en el método de carga de la batería, se enfocó en métodos para monitorear con precisión el estado electroquímico de la batería y ajustar dinámicamente la forma de onda de carga para obtener una eficiencia de carga aún mayor. El trabajo futuro se centra en agregar reconocimiento automático de la batería, determinación automática de la capacidad de la batería, métodos para mejorar el transporte de masa iónica, abordar las nuevas químicas de la batería a medida que ingresan al mercado y buscar continuamente nuevas e innovadoras formas de mover el estado del arte de carga de la batería [4].

El rendimiento de carga de la batería todavía se puede aumentar a través de la consideración de las características electroquímicas, ya que el proceso de carga está estrechamente relacionado con el estado de la batería [3, 12].

La carga de la batería desempeña un papel importante donde los algoritmos de carga concretamente los perfiles de carga o las corrientes de carga a lo largo del tiempo tienen una gran influencia en el rendimiento de la batería y en los ciclos de vida. Como tal, muchos algoritmos de carga se han desarrollado e implementado.

Los algoritmos varían el tiempo, la eficiencia y los ciclos de vida de la batería. Cada algoritmo que se diseña para contribuir en la mejora de carga para baterías trae consigo la complejidad de la implementación, los sensores necesarios y el costo. Los algoritmos de carga van desde el algoritmo de carga simple, como el de tensión constante y corriente constante (CC / CV) "simple por no ser necesario un microcontrolador", hasta el más creativamente complicado, como lo son el algoritmo de carga de múltiples etapas o la colonia de hormigas, que no son necesariamente los más efectivo [19].

De hecho, se han desarrollado tantos algoritmos de carga que se ha vuelto muy difícil determinar qué algoritmo es el más apropiado para una aplicación dada [19].

Atendiendo a los distintos sistemas de control en carga de baterías, se pueden diferenciar algunos algoritmos de carga:

3.0.1. Carga a Corriente Constante

Fue uno de los primeros algoritmos de carga donde se inyecta corriente constante durante todo el proceso de carga a la batería y el tiempo que toma la batería en llegar a límite de carga establecido esta dado por la magnitud de corriente que se inyecte, una tasa de corriente constante muy baja a la batería puede denominarse carga nocturna, pues su tiempo de carga toma mucho tiempo y no hacen nada para optimizar el rendimiento de la batería. La baja velocidad de carga permite que las reacciones químicas se localicen en la superficie del electrodo y conduzcan al crecimiento potencial de la dendrita aumentando la posibilidad de cortocircuitos y sobrecalentamientos. Sus largos tiempos de carga pueden generar un descuido por parte del usuario para gestionar el proceso de desconexión poniendo en riesgo la sobrecarga de la batería. El siguiente paso para la mejora de los tiempos de carga es aumentar la tasa de corriente constante, lo cual es una gran ventaja para los tiempos de carga, pero este enfoque también ignora el proceso electroquímico dentro de la batería, lo que resulta en efectos negativos significativos a largo plazo. La alta corriente constante causará una desviación significativa en las concentraciones de iones entre los electrodos. La carga a una tasa de corriente constante alta puede sobrecargar las reacciones químicas con respecto a la concentración de iones de soporte disponible en los electrodos. Esto da como resultado la generación de calor, junto con las dendritas y la formación cristalina deficiente de los electrodos [4].

Todos estos factores conducen a una capacidad reducida y acortan la vida útil de la batería.

3.0.2. Carga a Corriente Constante/Tensión Constante

Se presenta como uno de los algoritmos de carga más adoptado para las baterías secundarias en el mundo que se produce en dos etapas, la primer etapa donde se aplica una corriente constante hasta que la tensión de la batería se eleva a la tensión máxima de la batería, en el caso de las baterías de Li-Ion 4,2V en cuyo punto la tensión de carga pasa automáticamente a ser constante y la corriente se reduce exponencialmente por la diferencia de tensión entre el sistema de carga y la batería. En la segunda etapa se termina de cargar la batería en forma de carga lenta hasta que la corriente es inferior al 3 o 5 % de la tasa de carga. Este proceso requiere unas horas para cargar la batería a su capacidad máxima, en la figura 3.1 Se puede apreciar las dos etapas para la carga a tensión y corriente constante [4, 13].

La carga a tensión constante aumenta seriamente el tiempo de carga ya que la difusión de iones de litio en el electrodo es el paso que determina la velocidad en el proceso de carga. La lenta difusión de iones de litio inevitablemente da como resultado una polarización de la concentración, especialmente a la carga de alta corriente, llevando la tensión de la batería rápidamente al límite superior. Alternativamente, la carga a tensión constante baja la corriente al límite preestablecido antes de que el material activo en el electrodo se utilice por completo [13].

El algoritmo de carga a corriente constante y tensión constante (CC / CV) está bien desarrollado y ampliamente adoptado en la carga de baterías de iones de litio debido a su simplicidad y fácil implementación, debido a que este algoritmo de carga es muy fácil y económico de implementar ya que no requiere necesariamente un microcontrolador.

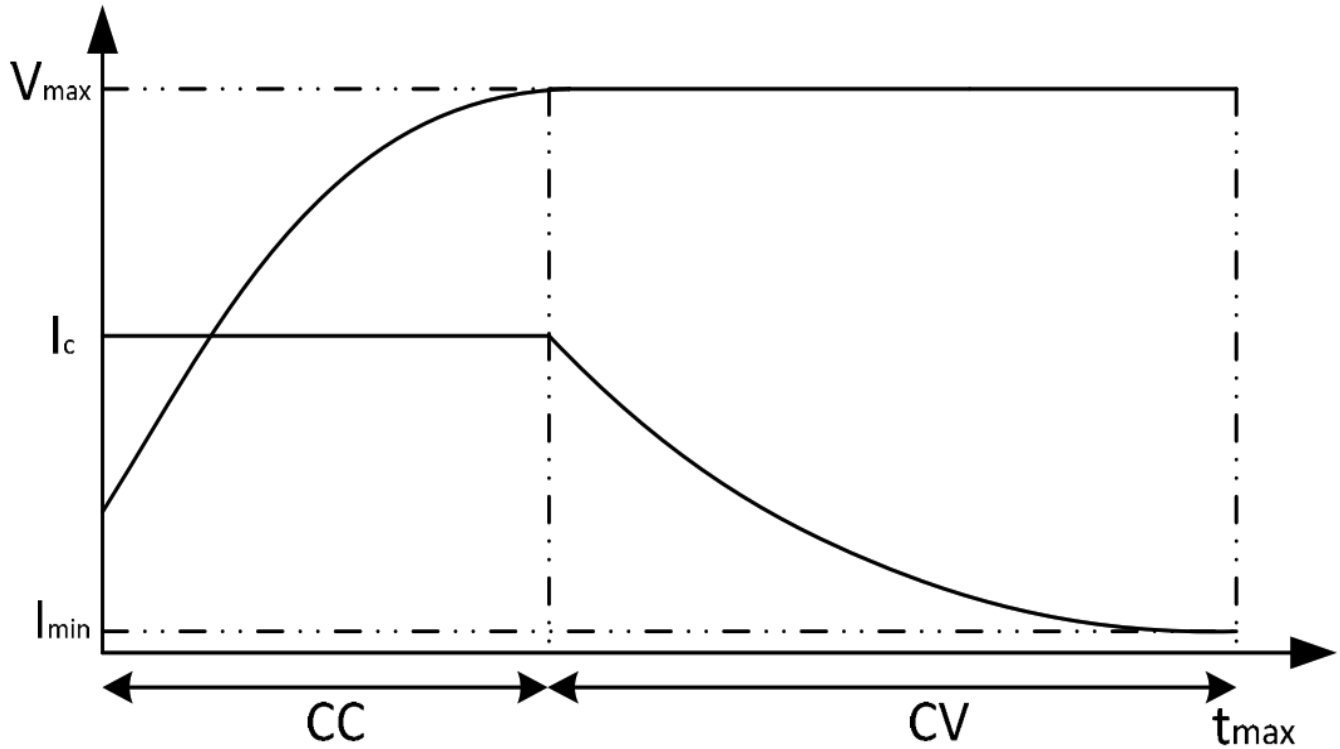


Figura 3.1: Algoritmo de carga a Corriente y Tension constante [19].

3.0.3. Carga Multietapa de Corriente Constante

Algoritmo que cuenta con cinco etapas de carga a corriente constante, en la cual se inyecta corriente de forma constante para cargar la batería hasta que se logra alcanzar la tensión máxima establecida $4,2V$. Una vez se logre llevar la tensión hasta el valor máximo establecido el algoritmo debe cambiar a la siguiente etapa como se muestra en la figura 3.2, donde la magnitud de la corriente se disminuye según la transición entre cada etapa [22, 19].

Es crítico determinar la corriente de carga adecuada en cada etapa con el límite de tensión preestablecido. Para solucionar este problema se utilizaron algunos enfoques como:

- El primer enfoque usó un controlador lógico difuso para determinar la corriente de carga donde las entradas del controlador difuso son la temperatura y la salida del controlador es la corriente de carga [11].
- El segundo enfoque adoptó la matriz ortogonal consecutiva (o método Taguchi) para buscar un perfil de corriente de carga óptima [15].
- El tercer enfoque aplicó el sistema de colonias de hormigas para optimizar un perfil de corriente de carga [16].
- El cuarto enfoque utilizó una programación lineal entera para buscar un perfil de corriente de carga óptimo [6].

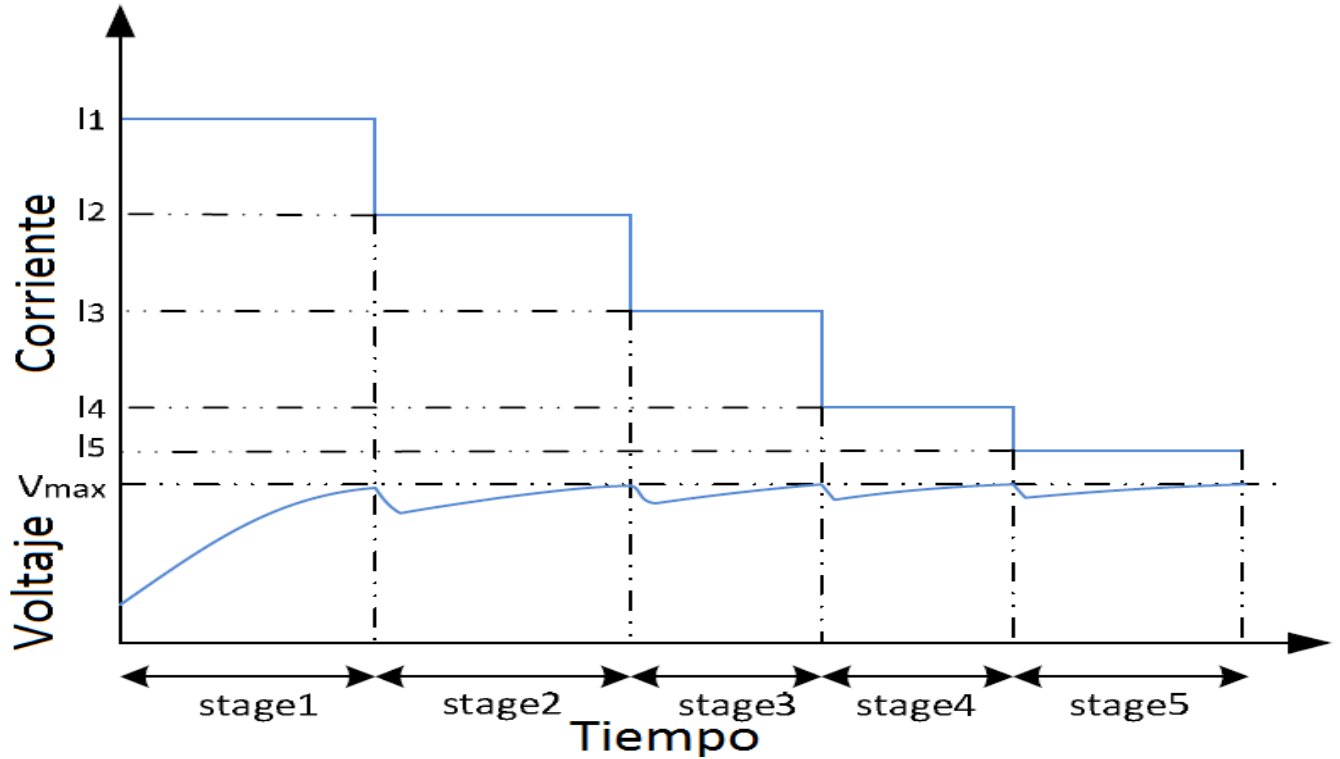


Figura 3.2: Algoritmo de carga Multietapas [19].

Los tres enfoques mencionados anteriormente se implementaron con los experimentos diseñados correctamente con una computadora. Debido a su complejidad y al requisito de alta potencia de cálculo, un microcontrolador es más adecuado para implementar ambos algoritmos de carga. La implementación de este algoritmo de carga requiere un microcontrolador o una computadora con el cual la velocidad de carga es más rápida y la eficiencia es mayor que la del método de CC/CV [19].

3.0.4. Carga a Pulsos

Este algoritmo de carga fue el primero en aumentar la eficiencia del proceso de carga al abordar los procesos químicos que ocurren en la batería. La técnica se basa en entregar a la batería una corriente y/o tensión pulsada, en lugar de CC/CV invariante, y proporcionar un período de descanso para que los iones se difundan y neutralicen. Este tipo de algoritmo puede aumentar el ciclo de vida de la batería y reducir el tiempo de carga. Por lo tanto, es ampliamente utilizado los sistemas avanzado de carga de baterías [3, 4].

Muchos algoritmos de carga de pulso fueron desarrollados y básicamente, se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo es la carga de pulso con corriente constante, el segundo grupo es la carga de pulso con la tensión constante.

3.0.5. Carga de Pulso con Corriente Constante

Mientras se monitorea la tensión de la batería para garantizar que la misma sea siempre más baja que la tensión de carga máxima preestablecida. El perfil de carga puede variarse cambiando la

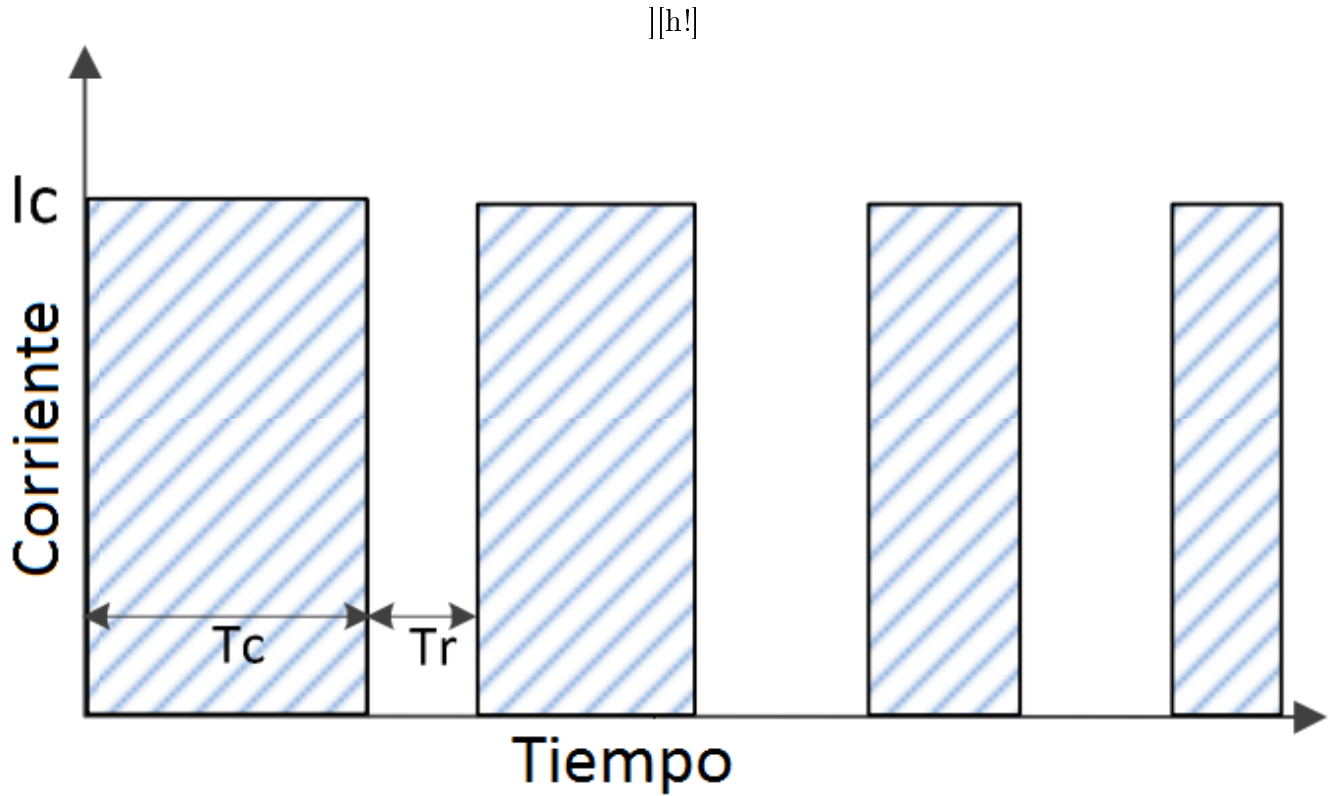


Figura 3.3: Algoritmo de Carga Pulsada con Corriente constante [19].

amplitud y el ancho del pulso y el período de relajación entre los pulsos. La figura 3.3 muestra el algoritmo de carga. Donde el tiempo de carga (T_c) se selecciona cuando se alcanza la concentración máxima y el período de relajación (T_r) se determina de modo que proporcione tiempo suficiente para una concentración de reinicio. Como resultado, las reacciones electroquímicas no producen calor ni causan la acumulación de presión dentro de la batería. Dado que este algoritmo de carga está diseñado para establecer el vínculo entre el perfil de corriente de carga de pulso y el proceso de reacción química, en principio puede cargar la batería más rápido y de manera más eficiente, así como prolongar la vida útil del ciclo de la batería [11, 19].

3.0.6. Carga a Pulsos con un Único pulso de Descarga Intercalado en el Pulso de Carga con Tiempo de Descanso

Este algoritmo implica agregar un pulso de descarga en el período de descanso. Después del período de carga por pulso hay un corto período de descanso seguido de un pulso de descarga de muy corta duración, aproximadamente 2.5 veces la magnitud del pulso de carga. Esto es seguido por otro período de descanso y el proceso se repite como se puede observar en la figura 3.4. La adición del pulso de descarga negativo único acelera el equilibrio de la concentración de iones y aborda algunos de los efectos negativos causados por reacciones químicas periféricas. La mayor velocidad a la que la batería vuelve a las condiciones equilibradas permite una mayor eficiencia de carga y un mejor rendimiento de la batería. Las altas corrientes momentáneas equilibran rápidamente la concentración de iones y mejoran la estructura cristalina metálica de los electrodos. El equilibrio mejorado de la concentración de iones conduce a un proceso de carga altamente eficiente que admite una corriente de carga mucho más alta. Esta alta corriente de carga produce los tiempos de

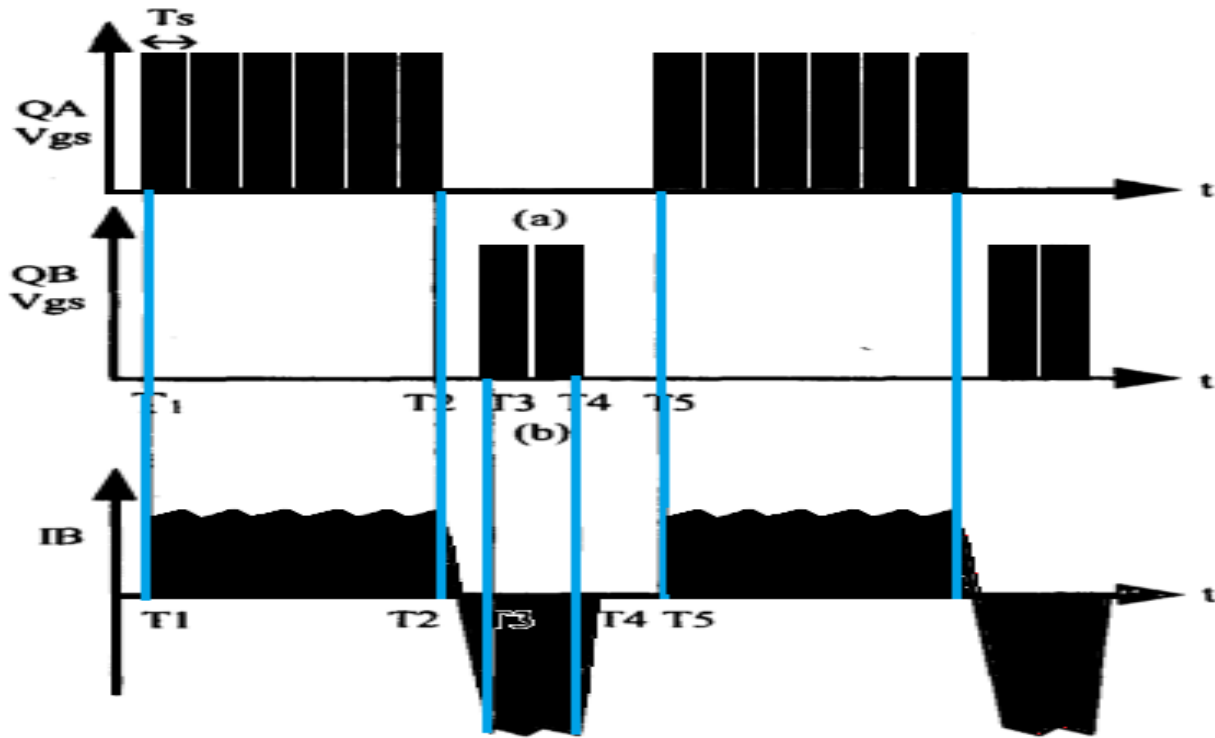


Figura 3.4: Algoritmo de carga a Pulsos con un pulso negativo en el periodo de descanso [14].

carga más cortos posibles [4].

3.0.7. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de la Frecuencia Óptima

El modo de búsqueda de frecuencia óptima permite cargar la batería inyectando la mayor corriente en cada paso del proceso de carga minimizando la impedancia de la batería.

Como se apreció en el capítulo 2 sección 2.9.2 la impedancia de la batería disminuye o aumenta dependiendo de la frecuencia. En otras palabras, con este algoritmo se busca entregar la mayor corriente de carga minimizando la resistencia interna de la batería y así mismo reducir las pérdidas de energía [2].

Para este tipo de algoritmo se generan pulsos con una tensión fija, una frecuencia inicial que varía con el tiempo, un ciclo de trabajo que se mantiene al 50 % y la corriente óptima que se inicializa en 0.4. Después de cargar durante cinco segundos por diferentes pulsos de frecuencia, el cálculo de la corriente de carga se realiza promediando la corriente en los últimos cinco segundos. Luego, se puede encontrar la frecuencia óptima con la corriente de carga promedio máxima. En la figura 3.5 se puede apreciar la variación de la frecuencia en el tiempo mientras se realizaba una carga mediante este algoritmo en una batería de litio a 4,2V [2].

Está claro que la frecuencia de carga de pulso óptima es variable, lo que significa que los sistemas de carga de pulso tradicionales que utilizan un pulso de frecuencia fija para cargar la batería no son perfectamente adecuados [2].

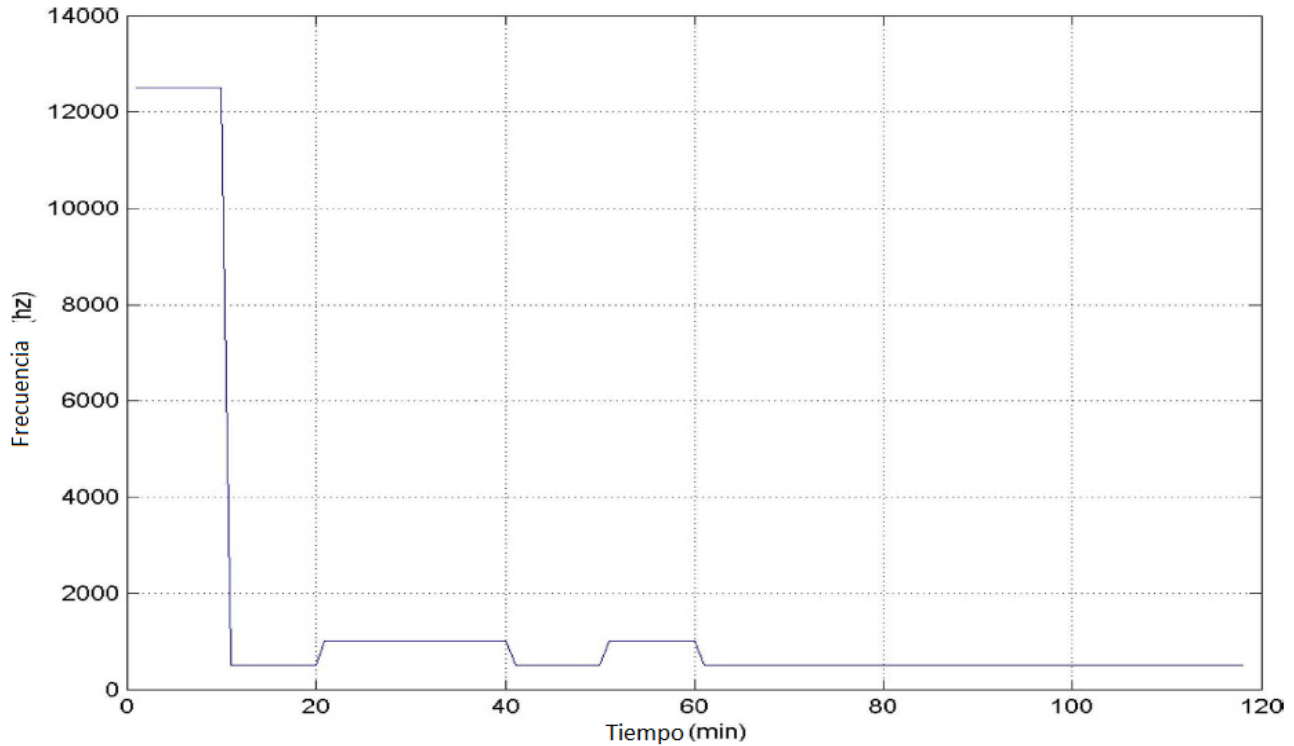


Figura 3.5: Algoritmo de Búsqueda de Frecuencia Óptima [2].

3.0.8. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de Ciclos de Trabajo

El modo de búsqueda de ciclo de trabajo óptimo permite cargar la batería inyectando la mayor corriente en cada paso del proceso de carga basándose en la curva límite de polarización la cual se describió en el capítulo 2 sección 2.9.3.

El método de búsqueda propuesto permite la determinación dinámica de un ciclo de trabajo óptimo y el control efectivo en el momento adecuado para los procesos de carga, reacción y difusión.

Debido a que la polarización concentrada de las baterías es alta al final del período de carga, la batería debe difundir el reactivo uniformemente en una reacción electroquímica. Este modo de búsqueda del ciclo de trabajo se centra en encontrar una longitud adecuada para el período de relajación, que puede ser un valor que no sea demasiado corto en difusión ni demasiado largo en la extensión del tiempo de carga [22].

La corriente de carga debe estar por debajo de la curva límite, tomando la tensión de polarización como límite, que se puede apreciar en la figura 2.9. Si la corriente de carga es más alta que el límite de la curva, la batería aumentará la tensión del terminal, e incluso La temperatura subirá hasta el umbral.

A medida que aumenta el SOC de la batería, la corriente aceptable basada en la curva de polarización disminuye gradualmente. Al detectar la curva de polarización para determinar la corriente

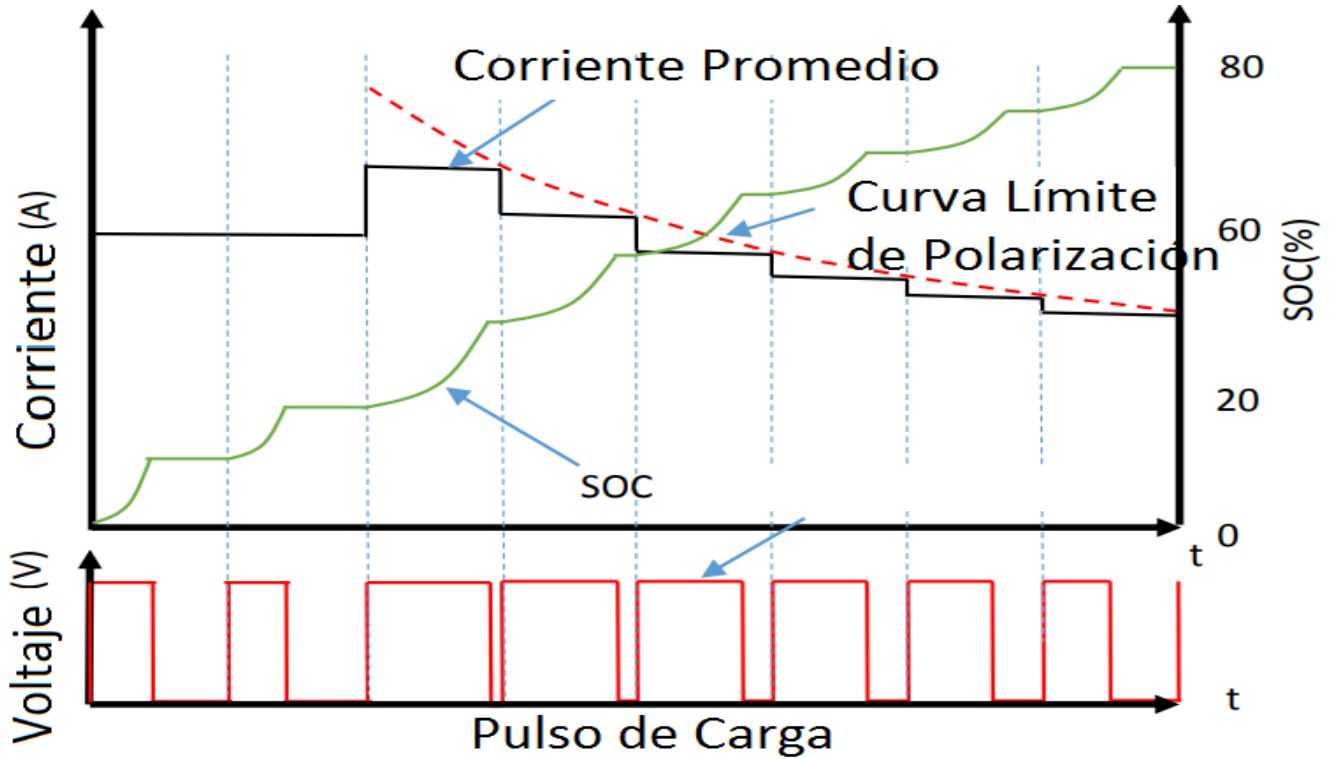


Figura 3.6: Corriente de Carga Pulsada con el Algoritmo de Búsqueda del ciclo de trabajo Optimo Basado en la Curva de Polarización [22].

de carga máxima, el método de búsqueda del ciclo de trabajo propuesto reduce gradualmente la corriente de carga promedio.

Para este tipo de algoritmo se generan pulsos con una tensión fija, un ciclo de trabajo del 10% $D1$, como se describe en la Ecuación 3.1. Este ciclo de trabajo se mantiene durante 5 segundos, el cual permite promediar la corriente para luego compararla con el corriente límite de la curva de polarización. Si la corriente promedio es más grande que la corriente límite, el ciclo de trabajo se actualiza. En la figura 3.6 se puede apreciar la variación del ciclo de trabajo dependiendo del SOC y la curva de polarización [21, 22].

Para reducir el tiempo de carga, el ciclo de trabajo aumenta en pasos del 10% hasta que el ciclo de trabajo alcanza el 90% o el SOC alcanza el porcentaje preestablecido [22].

$$D_n = n \cdot 0,1 (\text{Donde, } n : 1..,9) \quad [22] \quad (3.1).$$

Está claro que el ciclo de trabajo en la carga de baterías no es variable, lo que significa que los sistemas de carga de pulso tradicionales que utilizan pulsos fijos para cargar la batería no son perfectamente adecuados. En la figura 3.7 se puede observar la variación en los ciclos de trabajo mediante la carga por este algoritmo a una batería de litio con tensión Máxima de 4,2V

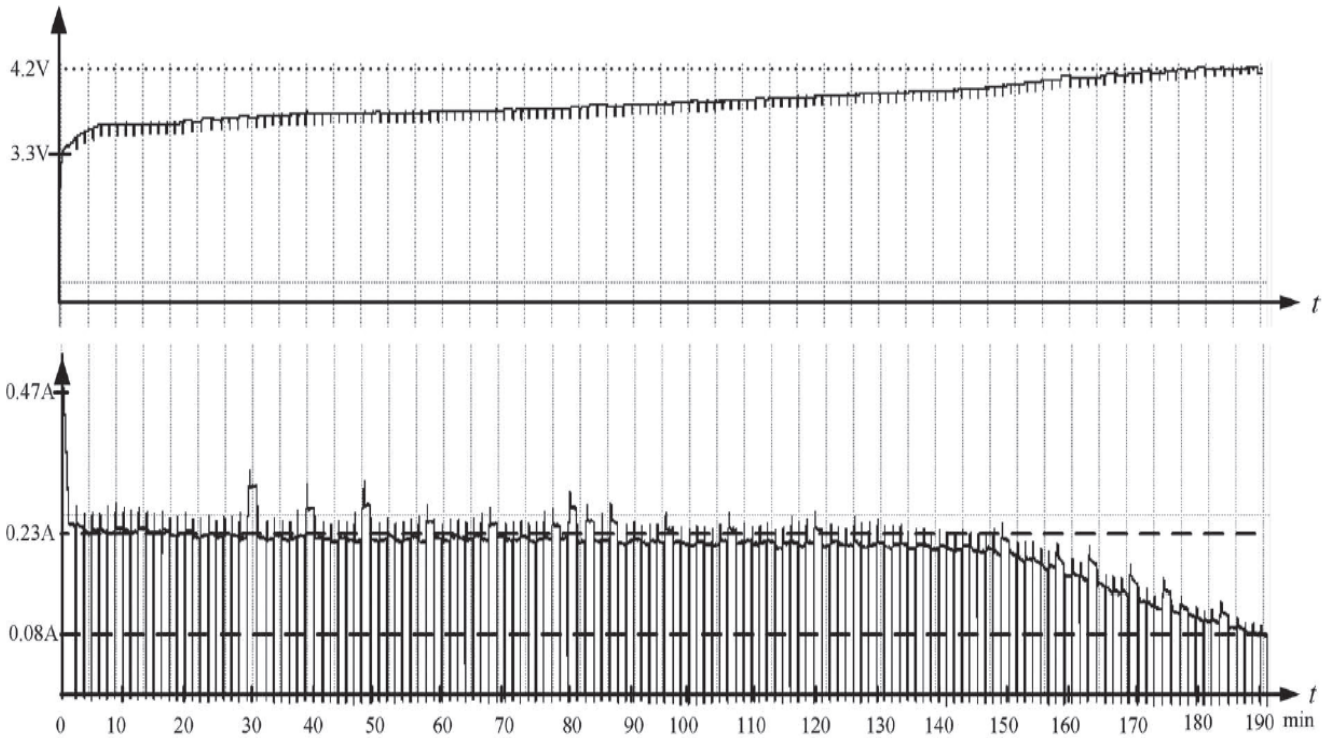


Figura 3.7: Ciclo de Carga Completo con el Algoritmo de Búsqueda del Ciclo de Trabajo Optimo [3].

3.0.9. Carga a Pulsos con Tensión Constante Búsqueda de Ciclos de Trabajo y Frecuencia

Este algoritmo se basa en dos modos de búsqueda óptimos, el primer modo es el de la búsqueda de una frecuencia y el segundo modo es el de la búsqueda de un ciclo de trabajo. El sistema adaptativo de pulsos determina una frecuencia y un ciclo de trabajo optimo en función de la corriente y el factor de carga promedio.

La frecuencia eficiente tiene un impacto significativo en la resistencia interna de la batería donde se minimiza el calentamiento de la resistencia interna. El ciclo de trabajo se controla para mantener la polarización en un nivel relativamente bajo, lo que garantiza la velocidad de carga rápida sin dañar la batería [21, 17, 22].

Para este tipo de algoritmo se generan pulsos con una tensión fija, un ciclo de trabajo entre el 50 % y 95 % y una frecuencia que varía entre los $800Hz$ y los $2000Hz$.

El algoritmo de carga inicia con un ciclo de trabajo del 50 % y una frecuencia fija de $600Hz$ con lo cual se calcula corrientes promedio para obtener el mejor ciclo de trabajo, con el mejor ciclo registrado se calculan corrientes y tensiones promedio para obtener la mejor frecuencia. Este proceso continuo hasta que la carga de la batería alcanza su valor establecido [17].

De acuerdo con la figura 3.9, se puede observar que la frecuencia de conmutación y el trabajo varían a lo largo del proceso de carga, lo que proporciona la inyección de carga máxima posible con menos pérdida de energía interna. Al mismo tiempo, aumenta la velocidad de carga debido a la difusión uniforme de iones [17].

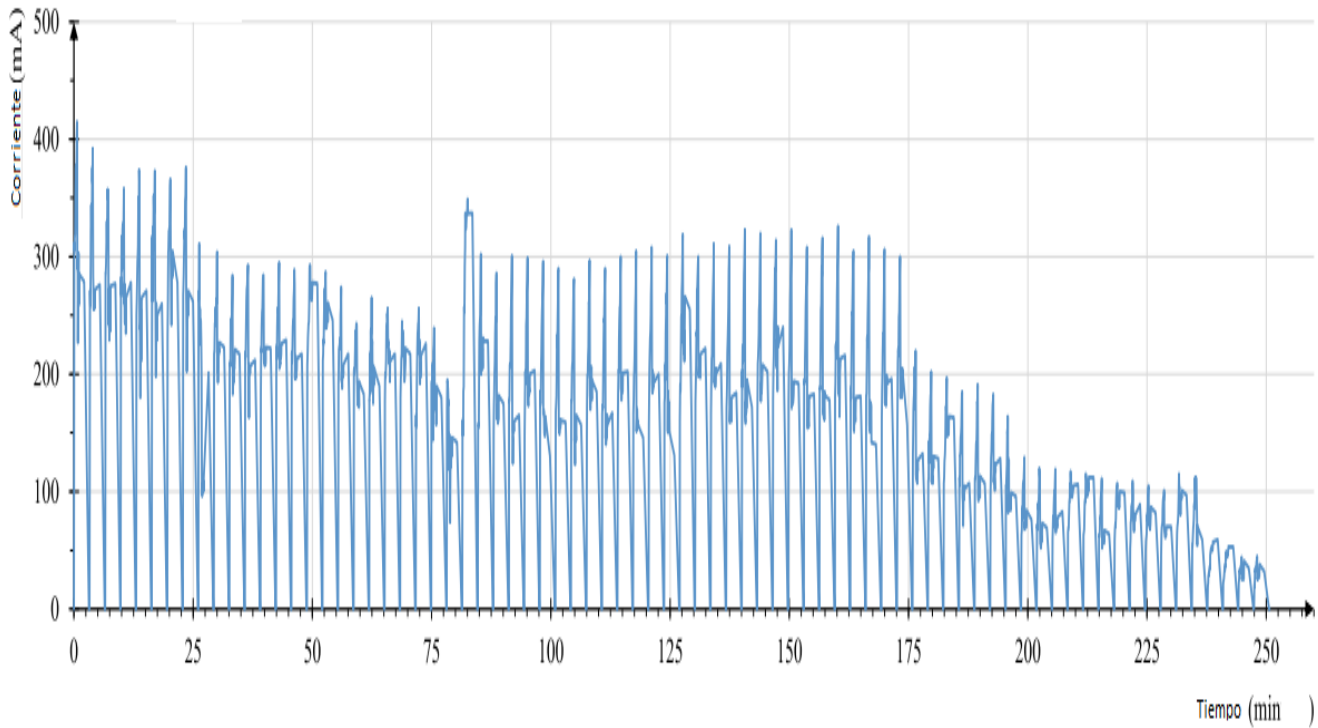


Figura 3.8: Corriente de Carga para el Algoritmo de Búsqueda de Frecuencia y Ciclo de Trabajo [17].

En la figura 3.8 se puede observar el comportamiento de la corriente de carga absorbida por la batería, donde se puede apreciar las variaciones en sus picos que corroboran la teoría de entregar una magnitud de corriente alta con la variación de la frecuencia y los ciclos de trabajo.

3.1. Efectos de los Diferentes Métodos de Carga

3.1.1. Carga de corriente constante

Carga de corriente constante lenta

Estos cargadores proporcionan una tasa de corriente constante muy baja a la batería y dependen de la intervención del usuario para detener la carga cuando la batería ha vuelto a su capacidad máxima. Estos cargadores nocturnos "lentos" generalmente están diseñados para cargar completamente una batería en aproximadamente diez horas. Son muy económicos y simples de diseñar, pero no hacen nada para optimizar el rendimiento de la batería. Su baja velocidad de carga permite que las reacciones químicas se localicen en la superficie del electrodo y conduzcan al crecimiento potencial de la dendrita. Su dependencia del usuario para gestionar el proceso de carga hace que la batería sea susceptible a la sobrecarga [4].

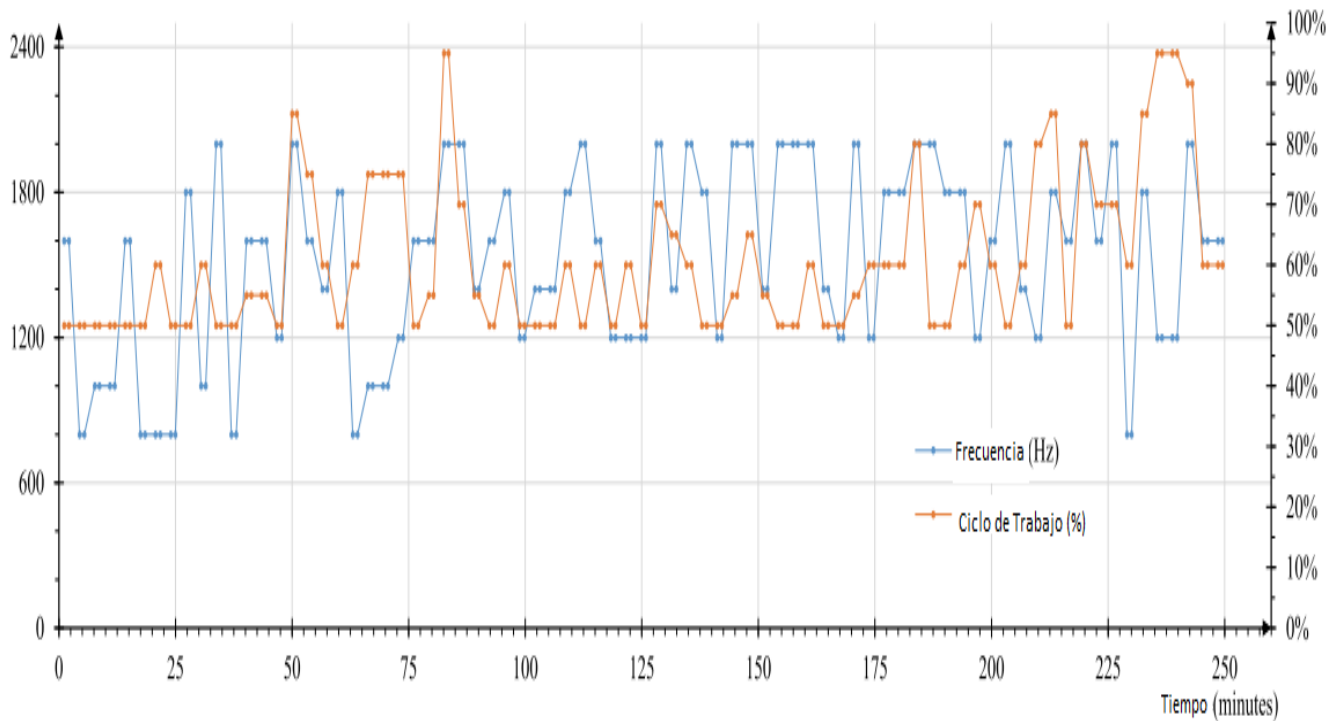


Figura 3.9: Variación Frecuencia y Ciclo de Trabajo en la Carga de una Batería con el Algoritmo de Búsqueda de Frecuencia y Ciclos de Trabajo Optimo [17].

Carga de corriente constante alta

La ventaja de este método es que se logra una carga equivalente en solo dos o tres horas. Sin embargo, este enfoque también ignora el proceso electroquímico dentro de la batería, lo que resulta en efectos negativos significativos a largo plazo. La alta corriente constante causará una desviación significativa en las concentraciones de iones entre los electrodos. La carga a una tasa de corriente constante alta puede sobrecargar las reacciones químicas con respecto a la concentración de iones de soporte disponible en los electrodos. Esto da como resultado la generación de calor, junto con las dendritas y la formación cristalina deficiente de los electrodos. Todos estos factores conducen a una capacidad reducida y acortan la vida útil de la batería [4].

3.1.2. Carga de corriente constante / Tensión constante

En este enfoque cae la corriente en la fase final de carga cuando hay menos superficie de electrodo disponible para reaccionar y la concentración total de iones puede ser menor. Este enfoque adolece de todos los mismos problemas en un grado ligeramente menor que el régimen de carga a corriente constante [4].

Cuando la batería de iones de litio está en proceso de carga a tensión constante, los iones se difunden lentamente. Este fenómeno causa una polarización de concentración que eleva la tensión de la batería sin consumir todo el material de la batería activa [14]. La difusión lenta se debe eliminar para la conversión completa del material activo [17].

El resultado directo de este proceso es una posible reducción de la capacidad de la batería y una vida más corta [4].

3.1.3. Carga de pulso

La carga pulsada implica periodos de relajación cortos los cuales pueden ayudar a minimizar el espesor de la capa de difusión, eliminar la polarización de concentración y aumentar la velocidad de transferencia de potencia. Esto conducirá a una alta densidad de corriente de intercambio porque los iones se están difundiendo libremente dentro del intervalo proporcionado por el pulso [17, 13].

La carga de pulso es útil para eliminar la polarización de concentración, aumentar la velocidad de transferencia de potencia y reducir el tiempo de carga eliminando la necesidad de una carga a tensión constante. La carga por pulsos interrumpe la carga de cc con períodos de relajación cortos y pulsos de descarga cortos durante la carga, y también mejora la utilización del material activo, proporcionando a la batería una mayor capacidad de descarga y una mayor vida útil del ciclo. Los estudios indican que la carga de pulso mantiene la estabilidad del cátodo de LiCoO₂ mejor que la carga de CC e inhibe el aumento en el espesor de la película pasiva en el ánodo durante el ciclo [13].

Se ha afirmado que la carga de pulso es un algoritmo de carga rápido y eficiente para baterías de iones de litio. Los efectos de la carga de pulso en las baterías de iones de litio [13].

3.1.4. Carga a pulsos con un único pulso de descarga intercalado en el pulso de carga con tiempo de descanso

La adición del pulso de descarga negativo único acelera el equilibrio de la concentración de iones y aborda algunos de los efectos negativos causados por reacciones químicas periféricas [14].

La limitación con un único pulso negativo es que, si éste es aplicado durante demasiado tiempo, pueden ocurrir efectos negativos. Estos efectos incluyen excesiva descarga de la batería, lo que aumenta el tiempo de carga y causa problemas en el transporte de iones en la dirección de la descarga [4].

3.1.5. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de la Frecuencia Optima

Esta implementación permite entregar la corriente de carga promedio máxima minimizando la impedancia de la batería, lo que significa que la batería de iones de litio funciona en la mejor y más rápida reacción electroquímica reduciendo las pérdidas [2, 22].

3.1.6. Carga a Pulsos con Tensión Constante y Búsqueda de Ciclos de Trabajo

El período de relajación durante el proceso de carga brinda la oportunidad de mantener la concentración de la corriente de carga en un nivel relativamente bajo, evitando que la batería se

sobrecaliente. Logrando un control óptimo y efectivo en el momento adecuado para el proceso carga, reacción y difusión. La adaptación de un ciclo de trabajo del pulso al disminuir la polarización garantiza una operación de carga segura de todas las baterías distribuidas dentro de un rango de temperatura de $5^{\circ}C$ a $45^{\circ}C$ [22].

El modo de búsqueda de ciclo de trabajo óptimo permite cargar la batería inyectando la mayor corriente en cada paso del proceso de carga [22].

3.1.7. Pulso Adaptativos

La frecuencia eficiente tiene un impacto significativo en la resistencia interna de la batería donde se minimiza el calentamiento de la resistencia interna, lo que deriva en una mayor eficiencia de carga. El ciclo de trabajo optimo mantiene la polarización en niveles relativamente bajos, lo que garantiza la velocidad de carga rápida sin dañar la batería. Este algoritmo de carga aumenta la velocidad de carga debido a la difusión uniforme de iones lo que genera periodos de descanso según el estado químico instantaneo lo que deriva en proceso de carga sin aumentar la temperatura [21].

Capítulo 4

Método Propuesto

El sistema de carga propuesto comprende una temperatura límite entre los $0^{\circ}C$ y los $25^{\circ}C$ para no afectar los procesos internos de la batería. Un estado de carga entre el 20 % y el 80 % donde el voltaje de polarización es mínimo.

Se fija la tensión a un valor igual de $4,2V * \text{Número de baterías}$, se generan pulsos de frecuencia variable entre cuatros rangos posibles entregados por el Arduino, y ciclos de trabajo entre 90 % y 60 %.

Durante el proceso de carga la corriente se ajusta automáticamente y varia con el tiempo siguiendo un comportamiento exponencial pulsado, donde el valor máximo es fijado según las características de carga rápida entregadas por el fabricante como se puede observar en la figura 4.1.

Los ciclos de trabajo y la frecuencia del pulso de carga pueden controlarse dinámicamente utilizando la temperatura de la batería y el SOC para determinar la inyección de corriente.

La frecuencia varia con la corriente por ende la frecuencia inicial para la carga de la batería se adapta al estado anterior de carga ya que la corriente que la batería absorbe de la fuente de carga depende del SOC, esto con el propósito de variar la resistencia interna de la batería, los rangos de frecuencia para la corriente de carga son:

- Frecuencia igual a $31372,55Hz$, para una corriente de carga inferior a los $0,29A$.
- Frecuencia igual a $3921,16Hz$, para una corriente de carga entre $0,99A$ y $0,3A$.
- Frecuencia igual a $490,20Hz$, para una corriente de carga entre $1,49$ y $1A$.
- Frecuencia igual a $122,55Hz$, para una corriente de carga entre el límite superior y $1,5A$.

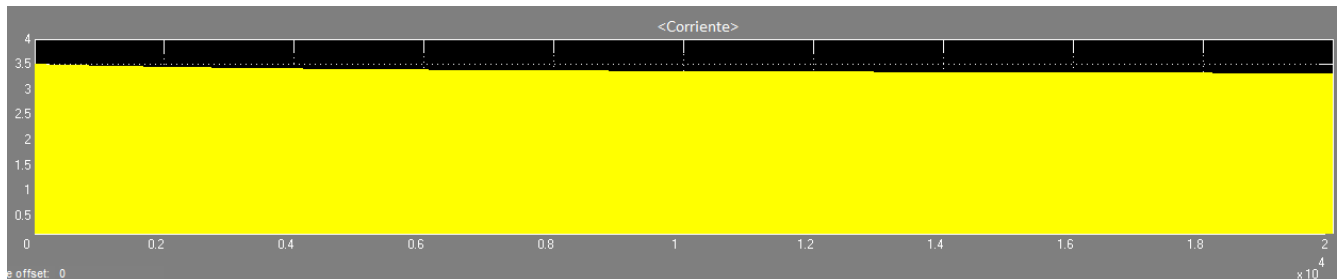


Figura 4.1: Simulación de Corriente Pulsada a $120Hz$

Los ciclos de trabajo varían con la temperatura lo que genera pulsos con diferentes períodos de descanso, esto con el propósito de minimizar la magnitud de corriente y a su vez reducir la temperatura interna de la batería minimizando los procesos internos de la misma, los ciclos de trabajo según la temperatura son:

- Ciclo de trabajo igual al 90 % para una temperatura entre $0^{\circ}C$ y los $9,99^{\circ}C$.
- Ciclo de trabajo igual al 80 % para una temperatura entre $14,99^{\circ}C$ y los $10^{\circ}C$.
- Ciclo de trabajo igual al 70 % para una temperatura entre $19,99^{\circ}C$ y los $15^{\circ}C$.
- Ciclo de trabajo igual al 60 % para una temperatura entre $24,99^{\circ}C$ y los $20^{\circ}C$.

4.1. Proceso de carga

El proceso de carga consta de los siguientes estados:

- Estado de exploración de temperatura.
- Estado de exploración de tensión.
- Estado de exploración de corriente.

El algoritmo principal opera en estos estados consecutivamente. Estos estados se ejecutan en intervalos de tiempo regulares definidos como Período de exploración de temperatura, Período de exploración de tensión y período de exploración de corriente.

El proceso de carga comienza desde una frecuencia y ciclo de trabajo al censar la tensión en bornes de las baterías, la corriente que absorbe la batería de la fuente de carga y la temperatura dentro de la misma.

Al detectar el SOC mediante la exploración mencionada anteriormente comienza el proceso de variación en frecuencia y ciclo de trabajo adaptándose al estado anterior de carga y así sucesivamente el proceso de carga continua siguiendo el bucle definido para el proceso de carga hasta que la batería llegue al SOC establecido.

Las operaciones detalladas de cada estado se explican a continuación.

1. Estado de exploración de temperatura.

Se calibra el sensor para que inicie con una temperatura igual a $0^{\circ}C$. Con el paso anterior se logra que el ciclo de trabajo inicial sea igual al 90 %. Los cambios en la temperatura varían el ciclo de trabajo y la batería de ion de litio se carga por pulsos.

2. Estado de exploración de corriente.

Se calibra el sensor para que se generen pulsos con una frecuencia inicial igual a $31372,55Hz$ mientras se censura la corriente que se esta absorbiendo de la fuente de carga y a medida que esta disminuye y supera los valores establecidos se presenta la variación de la frecuencia en los 4 rangos posibles con el Arduino Uno.

3. Estado de exploración de tensión.

Desde el proceso inicial de carga se censa la tensión en los bornes de la batería, la cual no debe superar el valor máximo de $4,2V * \text{Número de baterías en serie}$.

4. Estado de carga

Después de obtener la frecuencia y el ciclo de trabajo la batería se carga con pulsos a tensión constante y una corriente que varía durante el tiempo de carga ejecutando los estados definidos secuencialmente hasta que la corriente que se absorbe de la fuente de carga sea inferior a $0,35A$ lo cual verificado experimentalmente representa un 80% de carga.

4.2. Diseño y Ejecución del Sistema

Para verificar experimentalmente el rendimiento del método propuesto, se diseña e implementa un prototipo para cargar un pack de baterías compuesto de 6 baterías de litio, cada una con características similares a $2200mAh$ y una tensión máxima de $4,2V$, con lo cual se obtuvo un pack de baterías de $25,2V$ y $2200mAh$. como se muestra en la figura 4.2.

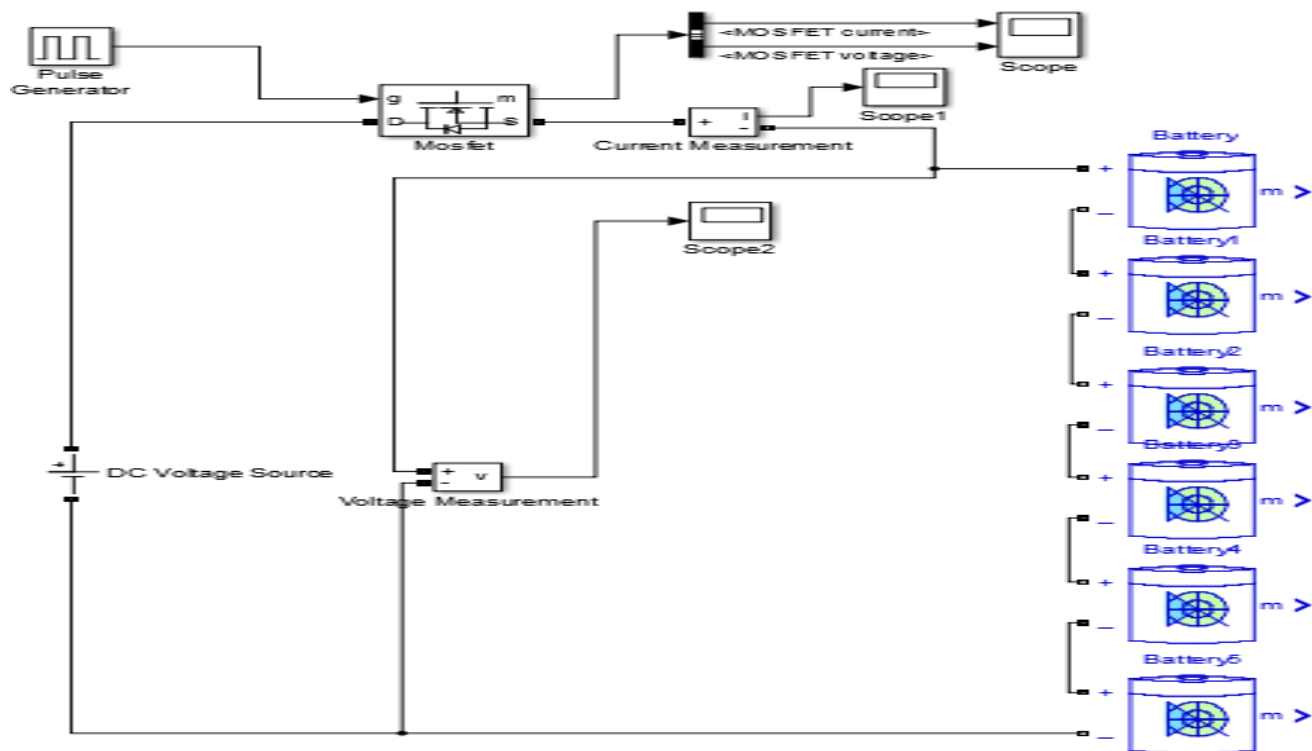


Figura 4.2: Pack de Baterías

El controlador principal del prototipo es un Arduino Uno que contiene un ATmega328P basado en un reloj de 16 MHz con convertidores análogos a digitales. Además del controlador principal, se tiene una fuente DC BK PRECISION 9110, Display LCD 16x2 para visualización de la tensión, corriente y temperatura, así mismos sensores tales como acs712t para medición de corriente, un LM35 para medición de temperatura, resistencias que forman un divisor de tensión para la medición de la tensión como se puede observar en la figura 4.3.

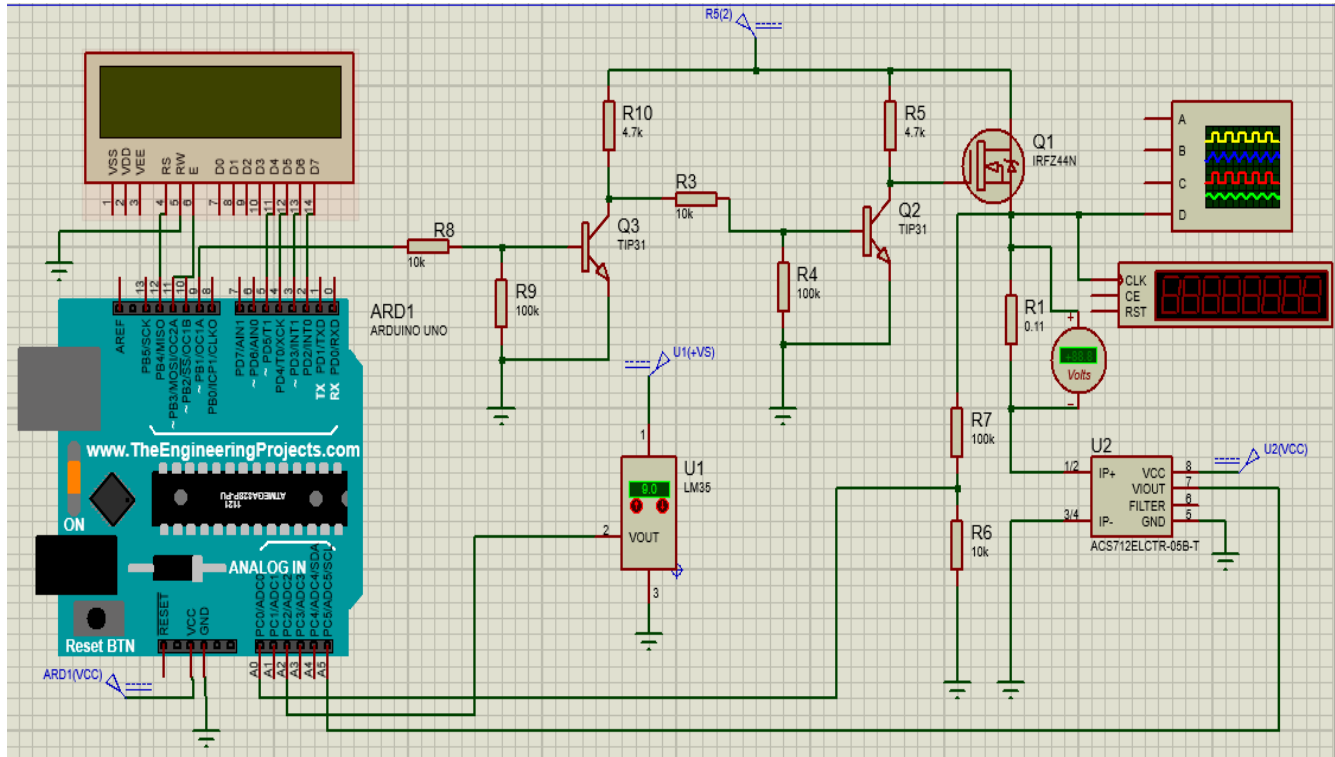


Figura 4.3: Prototipo Propuesto.

A continuación, se presenta el código de la implementación.

```
#include LiquidCrystal.h // Incluimos la librería LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); // Indicamos los pines digitales de conexión LCD

// Variables para el sensor de temperatura.
float temp; // Variable para almacenar el valor obtenido del sensor (0 a 1023)
float tempV = 0; // Se define la variable tempV
float tempC = 0; // Se define la variable tempC

// Variables para el sensor de tensión.
float vin = 0; // Se define la variable vin
float vout = 0; // Se define la variable vout
float R1 = 100000.0; // R1 (100K) Valor de la resistencia R1 del divisor de tensión
float R2 = 10000.0; // R2 (10K) Valor de la resistencia R2 del divisor de tensión.
int value = 0; // Definimos la variable value

// Variables para el sensor de corriente.
float voltajeSensor = 0; // Se define la variable voltajeSensor.
double corriente = 0; // Se define la variable corriente.
double valor = 0; // Se define la variable valor.
float Ireal = 0; // Se define la variable Ireal.

int muestras = 1000; // Se define el número de muestras para calibrar los sensores.
```

```

//ConfiguracindelibreriaparalavariacindeFrecuencia
voidSetPwmFreqP9P10(bytemode)
{
  if(mode < 0x01||mode > 0x04)return;
  TCCR1B = TCCR1B&0b11111000|mode;
}

voidsetup()
{
  lcd.begin(16,2); //seactivaelLCD
}

voidloop()
{
  for(inti = 0;i < muestras;i++)
  {
    temp = analogRead(2); //leemos el sensor ubicado en el pin de entrada anlogo 2, valores entre 0 a 1023.
    tempV = tempV + temp; //
  }

  tempV = tempV/muestras; //
  tempC = ((tempV · 0,0048875855327468)/0,01) - (40); //Ecuacinparaconocerlatemperatura.

  lcd.setCursor(9,1); //PosicindelcursorenelLCD.
  lcd.print("T = "); //textoenelLCD.
  lcd.print(tempC); //semuestraelvalordelatemperaturaenelLCD.
  delay(500); //

  for(inti = 0;i < muestras;i++)
  {
    value = analogRead(0); //leemoselsensorubicadoenelpindeentradaaanlogo0, valoresentre0a1023
    vin = vin+((value·0,0048875855327468)/(R2/(R1+R2))); //Calculoparaobtenervindeldivisorde tensin.
  }

  vin = (vin/muestras);

  if(vin < 0,09)
  {
    vin = 0; //Silalecturadevinesmenorque0,09Vmuestraenpantalla0V.
  }

  lcd.setCursor(0,1); //PosicinelcursorenelLCD.
  lcd.print("V = "); //MostramoseltextoenelLCD.
  lcd.print(vin); //MostramoselvalordelVinenelLCD.
  delay(500); //Sehaceunalecturadevoltajecada500ms.

  for(inti = 0;i < muestras;i++)

```

```

{
  valor = analogRead(5); //leemos el sensor ubicado en el pin de entrada analógico 5, valores entre 0 a 1023.
  Ireal = Ireal + valor;
}

Ireal = (Ireal/muestras) - 523;
voltajeSensor = (Ireal * 0,0048875855327468); //lectura del sensor
corrient = (-1) * (voltajeSensor ÷ 0,100); //Ecuación para conocer la corriente.

lcd.setCursor(9,0); //Posicionamos el cursor en el LCD.
lcd.print("Ir = "); //Mostramos el texto en el LCD.
lcd.print(Ireal, 3); //Mostramos el valor del Vin en el LCD.
delay(500); //Se hace una lectura de voltaje cada 500ms.

lcd.setCursor(0,0); //Posicionamos el cursor en el LCD.
lcd.print("I = "); //Mostramos el texto en el LCD.
lcd.print(corrient, 3); //Mostramos el valor del Vin en el LCD.
delay(500); //Se hace una lectura de voltaje cada 500ms.

int led = 9;

if(corrient <= 0,299)
{
  bytem = 0x1;
  SetPwmFreqP9P10(m);

  if(tempC > 0 && tempC < 9,99)
  {
    for(int brightness = 225; brightness < 230; brightness++)
    {
      analogWrite(led, brightness);
      delay(200);
      break;
    }
  }

  elseif(tempC >= 10 && tempC < 14,99)
  {
    for(int brightness = 200; brightness < 204; brightness++)
    {
      analogWrite(led, brightness);
      delay(200);
      break;
    }
  }

  elseif(tempC > 15 && tempC < 19,99)
  {

```

```

for(intbrightness = 170; brightness < 178; brightness++)
{
    analogWrite(led, brightness);
    delay(200);
    break;
}
}

```

```

elseif(tempC > 20 && tempC < 25)
{
    for(intbrightness = 148; brightness < 153; brightness++)
    {
        analogWrite(led, brightness);
        delay(200);
        break;
    }
}
}

```

```

if(corrient > 0,3 && corrient < 0,99)
{
    bytem = 0x2;
    SetPwmFreqP9P10(m);
}

```

```

if(tempC > 0 && tempC < 9,99)
{
    for(intbrightness = 225; brightness < 230; brightness++)
    {
        analogWrite(led, brightness);
        delay(200);
        break;
    }
}

```

```

elseif(tempC >= 10 && tempC < 14,99)
{
    for(intbrightness = 200; brightness < 204; brightness++)
    {
        analogWrite(led, brightness);
        delay(200);
        break;
    }
}

```

```

elseif(tempC > 15 && tempC < 19,99)
{
    for(intbrightness = 170; brightness < 178; brightness++)
    {

```

```
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}

elseif(tempC > 20 && tempC < 25)
{
for(intbrightness = 148; brightness < 153; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}
}

if(corrient > 1 && corrient < 1,499)
{
bytem = 0x3;
SetPwmFreqP9P10(m);

if(tempC > 0 && tempC < 9,99)
{
for(intbrightness = 225; brightness < 230; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}

elseif(tempC >= 10 && tempC < 14,99)
{
for(intbrightness = 200; brightness < 204; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}

elseif(tempC > 15 && tempC < 19,99)
{
for(intbrightness = 170; brightness < 178; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
```

```
break;
}
}

elseif(tempC > 20 && tempC < 25)
{
for(intbrightness = 148; brightness < 153; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}
}

if(corrient > 1,5 && corrient < 4)
{
bytem = 0x4;
SetPwmFreqP9P10(m);

if(tempC > 0 && tempC < 9,99)
{
for(intbrightness = 225; brightness < 230; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}

elseif(tempC >= 10 && tempC < 14,99)
{
for(intbrightness = 200; brightness < 204; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}

elseif(tempC > 15 && tempC < 19,99)
{
for(intbrightness = 170; brightness < 178; brightness++)
{
analogWrite(led, brightness);
delay(200);
break;
}
}
```



```

}

elseif(tempC > 20&& tempC < 25)
{
for(intbrightness = 148;brightness < 153;brightness++)
{
analogWrite(led,brightness);
delay(200);
break;
}
}
}
}
}
}

```

En la figura 4.1 se puede observar el comportamiento del SOC, la tensión y corriente simulado para la carga de un pack de baterías de Li-Ion con tensión pulsada a $120Hz$ y en la figura 4.5 se puede observar la representación esquemática del sistema propuesto.

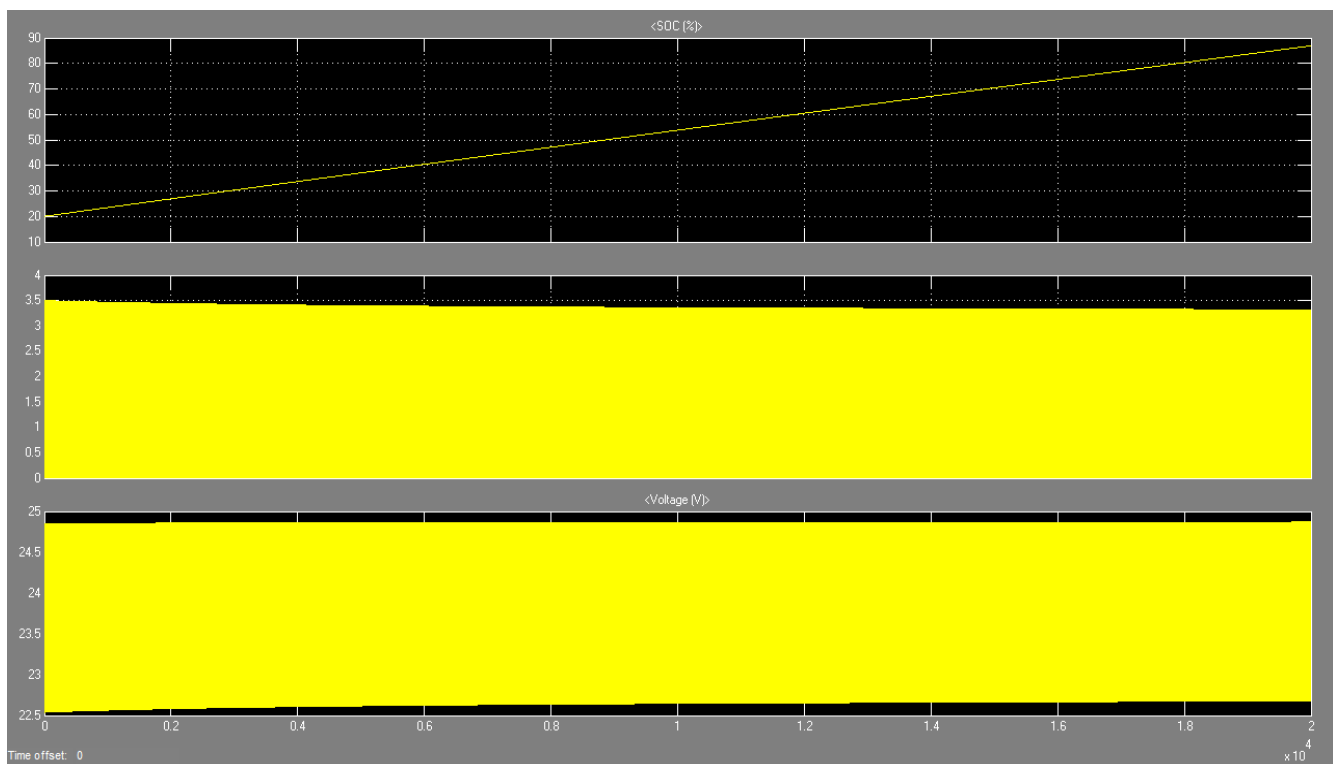


Figura 4.4: Simulación Carga de Batería a Tensión Pulsada.

En la representación esquemática se pueden observar la configuración los elementos tales como la fuente DC que dependiendo de la carga entrega tensión o corriente constante, así como la configuración de transistores para obtener una ganancia en tensión y así poder lograr la conmutación del mosfet con la variación de los pulso en frecuencia y ciclo de trabajo entregados por el Arduino uno.

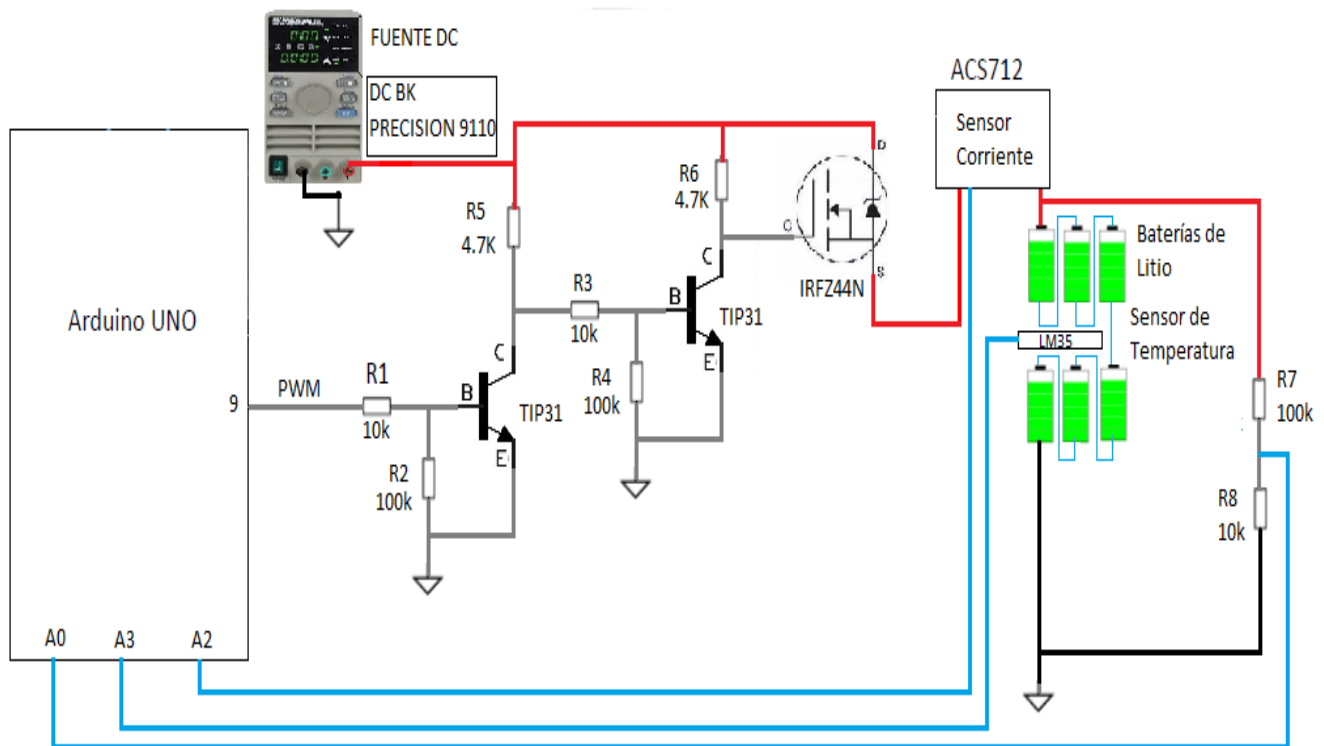


Figura 4.5: Esquemático

Capítulo 5

Resultados Experimentales

La implementación realizada se puede observar en la figura 5.1, donde el SOC de la batería se estimó experimentalmente mediante la magnitud de la corriente que absorbe la batería.

Antes de iniciar el proceso de carga se verifico que el SOC del pack de baterías estuviese en el 20 % equivalente a 21,2V en la tensión de circuito abierto. Una vez el sistema de carga comenzó, la corriente de carga absorbida por la batería desde la fuente se elevó hasta que alcanzó un valor máximo de 2,2A. Esta corriente pulsada se inyectó a la batería con una frecuencia igual a los 122,55Hz y un ciclo de trabajo del 90 % y a pesar de tener programado ciclos de trabajo inferiores según fuese el comportamiento de la temperatura interna de la batería esta no vario ya que temperatura nunca sobrepaso los 10°C. Mientras que la frecuencia se incrementó a medida que la corriente disminuyo. Este proceso de carga pulsada con variación en los ciclos de trabajo y frecuencia se llevó a cabo durante 45 minutos, donde la corriente que se absorbía de la fuente de carga por parte de la batería se encontraba cercana a los 0,35A aproximadamente un 80 % del SOC con una tensión de circuito abierto de 24,6V, donde finalizo el proceso de carga.

El comportamiento de la corriente durante el proceso de carga se puede observar en la figura 5.2. Donde se puede observar unas perturbaciones en los 1,5A y 1A pertenecientes a la variación de la frecuencia afectando directamente la impedancia de la batería.

La gráfica de la temperatura se puede observar en la figura 5.3. Donde se puede observar que esta nunca sobrepaso los 10°C por lo cual la batería se cargó a un ciclo de trabajo igual al 90 % permitiendo la difusión de iones de litio dentro de la batería y garantizando una velocidad de carga rápida.

En la figura 5.4 se puede observar las frecuencia que intervinieron durante el proceso de carga y con el cual se afecto directamente la impedancia interna del pack de baterías.

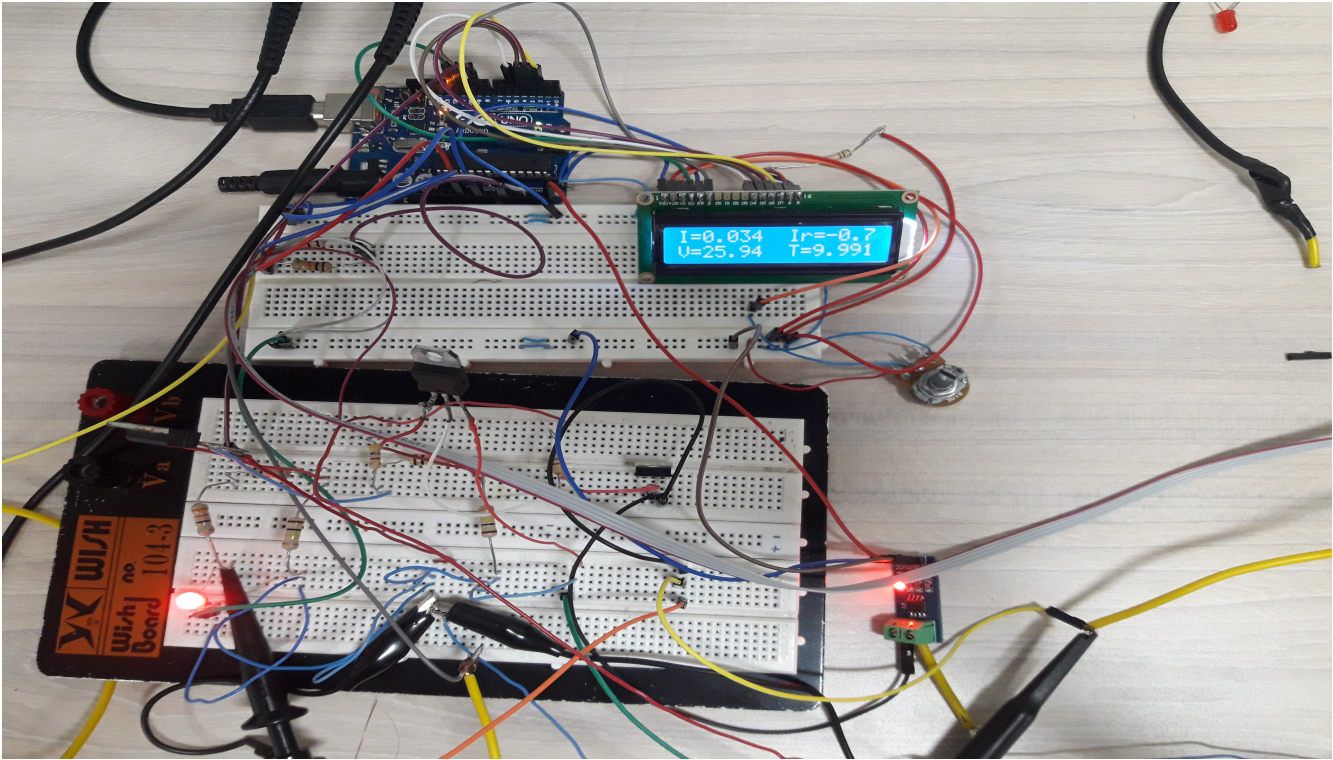


Figura 5.1: Prototipo Propuesto

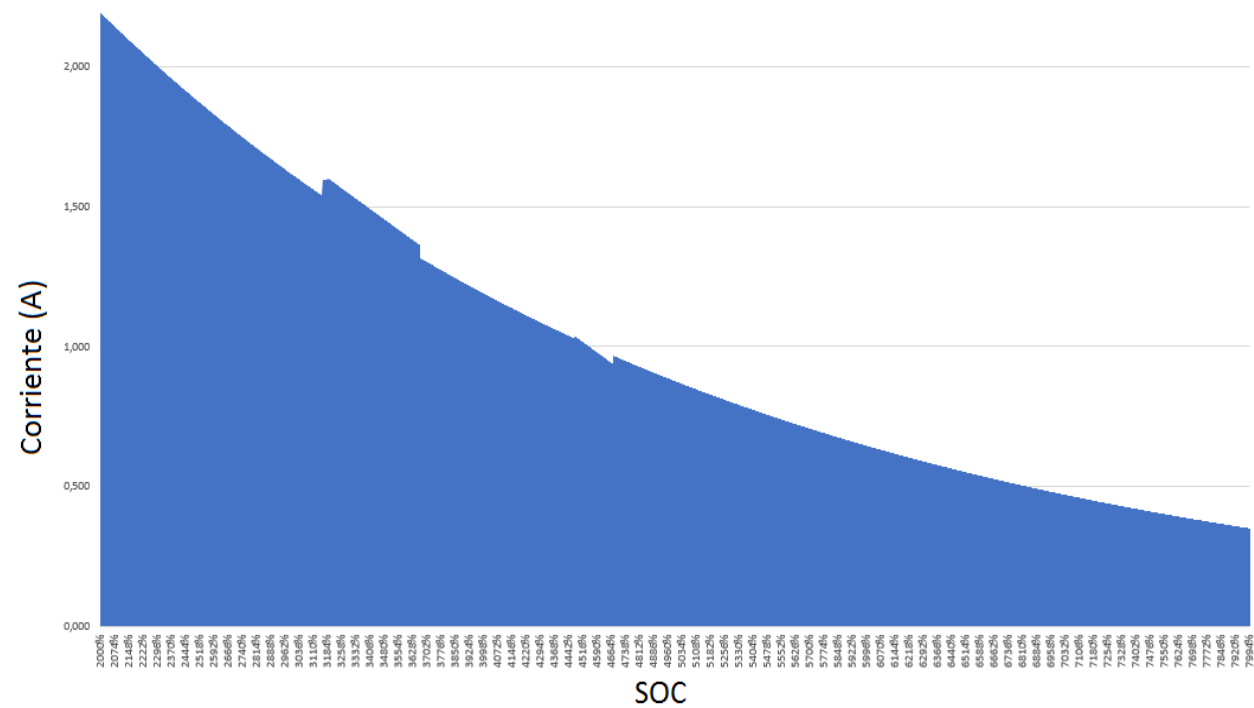


Figura 5.2: Corriente Obtenida Durante el Proceso

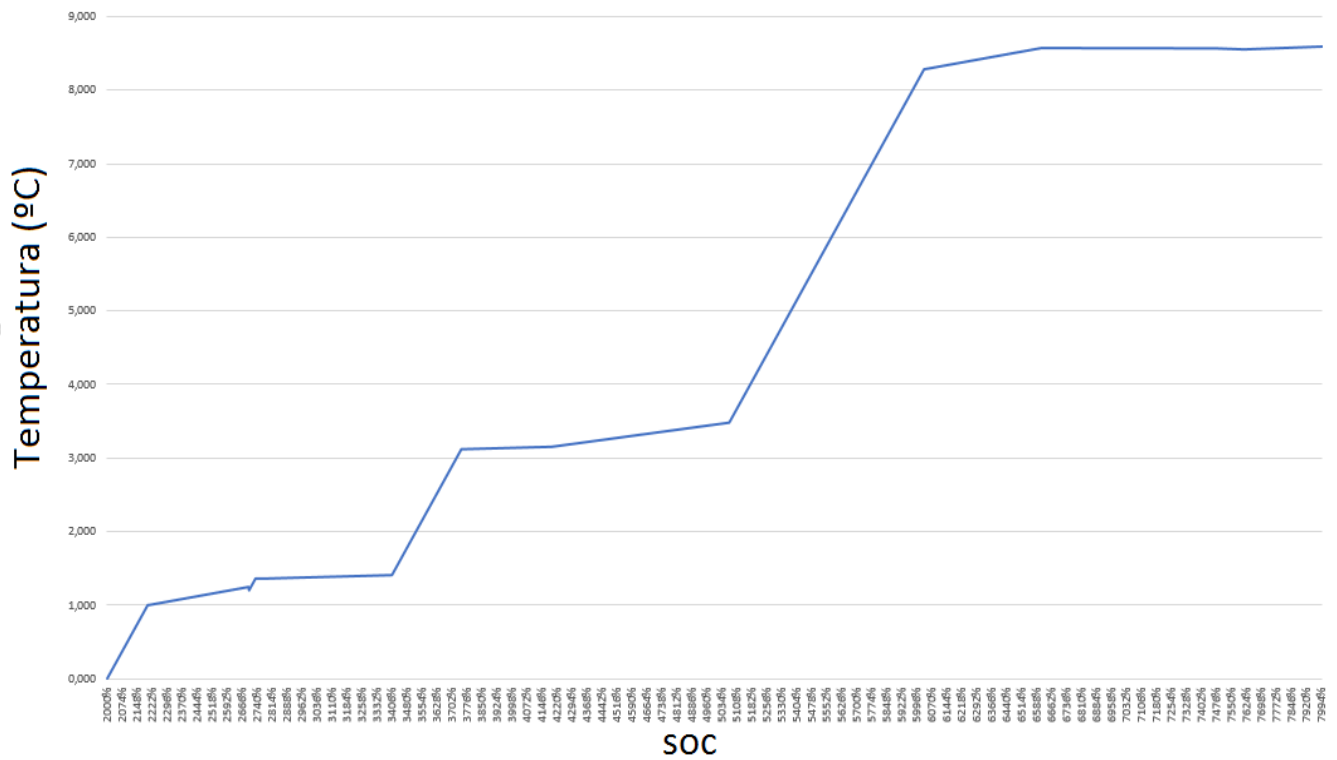


Figura 5.3: Temperatura Alcanzada Durante el Proceso de Carga

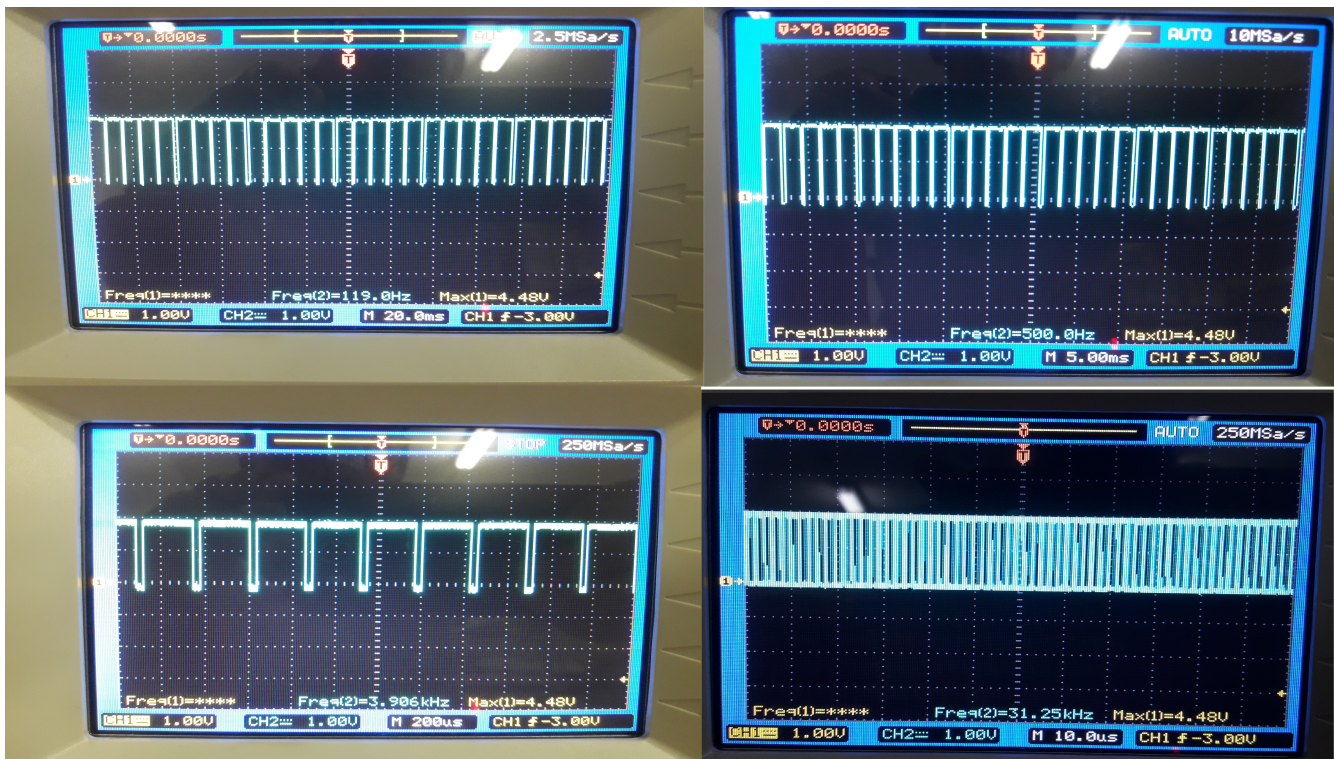


Figura 5.4: Frecuencias Obtenidas Durante el Proceso de Carga

Capítulo 6

Conclusiones

Después de realizar la investigación sobre los diferentes algoritmos de carga para baterías de litio y de realizar una implementación donde se pudo conocer experimentalmente el comportamiento de una batería con el sistema de carga propuesto, se puede concluir que dicho sistema beneficia a la temperatura interna de la batería reduciendo el daño a las funciones electroquímicas internas, puesto que nunca se sobrepasó una temperatura mayor a 10°C lo cual permitió que la batería se cargara con un ciclo de trabajo igual a 90 % durante todo el proceso de carga, además se pudo verificar que la resistencia interna de la batería varía con la frecuencia toda vez que al generarse la variación de la frecuencia la corriente de carga aumentaba.

Aunque no se realizaron comparaciones con otros métodos el tiempo estimado de carga es muy similar con respecto a los resultados obtenidos en los diferentes algoritmos investigados dentro de este trabajo de investigación.

Comparando esta implementación con los diferentes algoritmos investigados, presenta una buena relación entre el costo computacional y el beneficio, puesto que los algoritmos investigados con excepción de los métodos tradicionales de carga adoptan un algoritmo relativamente complejo, lo que puede causar dificultades en términos de implementación.

Por otro lado, aunque se aplican períodos de relajación, variaciones en la frecuencia y ciclos de trabajo se debe evaluar los impactos del algoritmo propuesto evaluando los ciclos de vida de las mismas.

6.1. Futuros trabajos de investigación

Como futuros trabajos se propone: Automatizar el método propuesto volviendo el mismo inteligente, donde se produzca la desconexión de la red una vez la batería alcance el SOC establecido, además generar un sistema de gestión de baterías conocido en inglés por sus siglas (BMS) que permita garantizar que las baterías en serie no se verán perjudicadas en el proceso de carga con sobretensiones ni aumentos de la temperatura.

Bibliografía

- [1] María del Carmen Abreu Custodio. Diseño de un cargador de baterías de litio. 2015.
- [2] L. R. Chen. A design of an optimal battery pulse charge system by frequency-varied technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):398–405, Feb 2007.
- [3] L. R. Chen. Design of duty-varied voltage pulse charger for improving li-ion battery-charging response. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2):480–487, Feb 2009.
- [4] R. C. Cope and Y. Podrazhansky. The art of battery charging. In *Fourteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference (Cat. No.99TH8371)*, pages 233–235, 1999.
- [5] P.E de Jongh and P.H.L Notten. Effect of current pulses on lithium intercalation batteries. *Solid State Ionics*, 148(3):259 – 268, 2002. Proceedings of the Symposium on Materials for Advanced Batteries and Fuel Cells. Organised in conjunction with the International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2001).
- [6] Lan-Ron Dung and Jieh-Hwang Yen. Ilp-based algorithm for lithium-ion battery charging profile. In *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 2286–2291, July 2010.
- [7] David G.Artés. Baterías de coches eléctricos e híbridos, hoy [estado de la tecnología del automóvil]. Accedido en 03-06-2018 a url <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/>, 14 de marzo de 2012.
- [8] Roberto González. Guía de buenas prácticas energéticas en oficinas. Accedido en 14-06-2018 a url <https://twenergy.com/guias-eficiencia-energetica/guia-de-buenas-practicas-energeticas-en-oficinas>, 15-02-2017.
- [9] Antonio Hernández Romero. Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico. 2016.
- [10] A. Hoke, A. Brissette, K. Smith, A. Pratt, and D. Maksimovic. Accounting for lithium-ion battery degradation in electric vehicle charging optimization. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3):691–700, Sept 2014.
- [11] J. Huang, Y. Liu, S. Wang, and Z. Yang. Fuzzy-control-based five-step li-ion battery charger. In *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pages 1547–1551, Nov 2009.

-
- [12] J. Jiang, Q. Liu, C. Zhang, and W. Zhang. Evaluation of acceptable charging current of power li-ion batteries based on polarization characteristics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12):6844–6851, Dec 2014.
 - [13] Jun Li, Edward Murphy, Jack Winnick, and Paul A Kohl. The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 102(1):302 – 309, 2001.
 - [14] T. J. Liang, T. Wen, K. C. Tseng, and J. F. Chen. Implementation of a regenerative pulse charger using hybrid buck-boost converter. In *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*, volume 2, pages 437–442 vol.2, Oct 2001.
 - [15] Y. Liu and Y. Luo. Search for an optimal rapid-charging pattern for li-ion batteries using the taguchi approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12):3963–3971, Dec 2010.
 - [16] Yi-Hwa Liu, Jen-Hao Teng, and Yu-Chung Lin. Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using ant colony system algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(5):1328–1336, Oct 2005.
 - [17] S. M. I. Niroshana and S. Sirisukprasert. Adaptive pulse charger for li-ion batteries. In *2017 8th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, pages 1–6, May 2017.
 - [18] Ángel Iván Rodríguez Cea et al. Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico. 2017.
 - [19] Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, and A. Kapoor. Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. In *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pages 1567–1572, July 2012.
 - [20] R. M. Spotnitz. Ac impedance simulation for lithium-ion cells. In *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances (Cat. No.00TH8490)*, pages 121–126, Jan 2000.
 - [21] M. D. Yin, J. Youn, D. Park, and J. Cho. Dynamic frequency and duty cycle control method for fast pulse-charging of lithium battery based on polarization curve. In *2015 Ninth International Conference on Frontier of Computer Science and Technology*, pages 40–45, Aug 2015.
 - [22] Meng Di Yin, Jeonghun Cho, and Daejin Park. Pulse-based fast battery iot charger using dynamic frequency and duty control techniques based on multi-sensing of polarization curve. *Energies*, 9(3):209, 2016.
 - [23] Caiping Zhang, Jiuchun Jiang, Yang Gao, Weige Zhang, Qiujiang Liu, and Xiaosong Hu. Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time. *Applied energy*, 194:569–577, 2017.